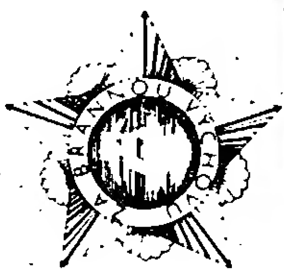
Amatérské RADIO

NOSITEL VYZNAMENÁNÍ ZA BRANNOU VÝCHOVU I. A II. STUPNĚ



ŘADA B PRO KONSTRUKTÉRY

ČASOPIS PRO ELEKTRONIKU A AMATÉRSKÉ VYSÍLÁNÍ

ROČNÍK XXXIII/1984 ● ● ČÍSLO 2

V TOMTO SEŠITĚ

AMATÉRSKÉ RADIO ŘADA B

Vydává ÚV Svazarmu ve vydavatelství NAŠE VOJSKO, Vladislavova 26, 133 66 Praha 1, tel. 26 06 51–7. Šéfredaktor ing. Jan Klabal, redaktor Luboš Kalousek, OK1FAC. Redakční radu řídí Ing. J. T. Hyan.

Redakce Jungmannova 24, 113 66 Praha 1, tel. 26 06 51–7, šéfredaktor linka 354, redaktor linka 353, sekretářka linka 355. Ročně vyjde 6 čísel. Cena výtisku 5 Kčs, pololetní předplatné 15 Kčs. Rozšiřuje PNS, v jednotkách ozbrojených sil vydavatelství NAŠE VOJSKO, administrace Vladislavova 26, Praha 1. Objednávky přijímá každá pošta i doručovatel. Objednávky do zahraničí vyřizuje PNS, ústřední expedice a dovoz tisku, závod 01, Kafkova 9, 160 00 Praha 6. Tiskne NAŠE VOJSKO, n. p., závod 08, 160 05 Praha 6, Vlastina ulice č. 889/23.

Za původnost a správnost příspěvku odpovídá autor. Návštěvy v redakci a telefonické dotazy pouze po 14. hodině. Číslo indexu 46 044.

Toto číslo má vyjít podle plánu 20. 3. 1984.

JAK DÁL?

Ke zdárnému splnění náročných úkolů v rozvoji elektronizace, kybernetizace a automatizace národního hospodářství je mimo jiné důležité dosáhnout podstatného zvýšení zájmu o tyto obory a celkové informovanosti u širší veřejnosti. Je třeba, aby zejména vedoucí a vývojoví pracovníci, ale i střední technické kádry neelektronických oborů (jako jsou např. lehké a těžké strojírenství, doprava, administrativa, stavebnictví, zemědělství, potravinový, textilní a spotřební průmysl, družstevní organizace i ČSLA a studijní a učební zařízení atd.) měli hlubší znalosti o elektronice a mikroelektronice a mohli tak účinněji prosazovat její aplikace do nově vyvíjených zařízení. Názornou ukázkou potřeb v tomto směru byla i výstava „Elektronika a automatizace", pořádaná ve Sjezdovém paláci PKOJF v Praze. Doplňující znalosti mohou uvedení pracovníci získat buď školským, nebo individuálním studiem. Ve školách všech stupňů se výuka rozšiřuje rozvojem nové výchovně vzdělávací soustavy, v níž se zvyšuje rozsah výuky informatiky, kybernetiky, elektroniky i automatizační a výpočetní techniky. K organizovanému vzdělávacímu procesu patří i různé kursy a školení na základě dohod mezi resortem elektrotechnického průmyslu a ČSVTS, Svazarmem, Socialistickým svazem mládeže a Socialistickou akademií, díky které bylo v průběhu školního roku 1982–83 vyškoleno téměř pět set lektorů pro práci se školními mikropočítači. Je to základ pro splnění záměru připravit 100 tisíc odborníků pro zavádění mikroelektroniky do národního hospodářství. Připravení lektoři se mohou dále školit ve střediscích ČSVTS, Svazarmu, SSM a Socialistické akademie.

To ovšem neznamená, že posluchači po ukončení kursu, stejně jako absolventi odborných škol, mohou zůstat jen u získaných vědomostí. Elektronika se v současné době rozvíjí velmi rychlým tempem, a co je dnes špičkou, to bude již zítra zastaralé. Je proto třeba stále se průběžně seznamovat s novými konstrukcemi, návrhy a řešeními elektronických obvodů a to v co nejkratší době po jejich vzniku.

V období před nástupem mikroelektroniky byla informovanost o novinkách v technologii, konstrukci, nových prvků atd. (i při soustavném rozvoji klasické radioelektroniky) vyhovující. S rozvojem mikroelektroniky a jejího přímého vlivu na modernizaci všech odvětví národního hospodářství se však stále zvyšují požadavky na informace z oblasti elektronických a mikroelektronických aplikací a technologií. Tato skutečnost je v publicistice známa a proto stejně jako jinde ve světě i u nás se věnuje informacím o rozvoji elektroniky, mikroelektroniky a výpočetní techniky značná pozornost. Řada periodik, i když neucelenĕ, seznamuje své čtenáře s novými výrobky elektronického průmyslu či elektronikou ovládanými a řízenými exponáty na výstavách a veletrzích (často i nekvalifikovaně), s úspěchy ve výrobě výpočetní a digitální techniky, postupující automatizací a robotizací, s dohodami o spolupráci mezi podniky elektronického průmyslu u nás i se zahraničními partnery, o licencích či nových výzkumných a vývojových úkolech a jejich řešeních, jsou dostupné i údaje o nových součástkách i další technické, obecně zaměřené informace o použití mikroelektroniky v různých oborech – to vše, a to je podstatné, na úrovni všeobecných či populárních informací.

8. zasedání pléna ÚV KSČ k vědeckotechnickému rozvoji připomenulo, že soustavný zápas za zvyšování efektivnosti výroby na základě využití technického pokroku nelze nahradit agitací, osvětou či předpisy a administrativními nařízeními a upozornilo přitom na závažnou skutečnost, že řada zejména výzkumných a vývojových pracovišť řeší technické problémy obdobného i stejného charakteru, což představuje značnou nehospodárnost.

A právě v oblasti elektroniky je téměř běžným jevem, že tytéž obvodové celky (výpočetní, digitální, automatizační, výkonové, obvody čidel aj.) řeší u nás stovky pracovišť na různé profesionální úrovni (od družstevních po centrální podniky, ČSLA nevyjímaje) bez vzájemného bližšího kontaktu a vzájemné široké výměny vhodných konstrukčních řešení.

Vzájemná neinformovanost pak vede často k dlouhým vývojovým lhůtám, ke konstrukcím zastaralým či netypickým (nebo s použitím těžko dostupných zahraničních součástek či stavebních dílů, protože se v návrhu využije obvodového řešení, převzatého ze zahraničního pramenu, což je dosud velmi častá praxe). Obtížné je pak i zajištění unifikace a tím i záměnnosti náhradních dílů těchto výrobků a to i při respektování platných norem. Typickým případem byl např. vývoj tzv. měřicích ústředen začátkem 70 let, kdy množství pracovišť řešilo jejich konstrukce s různou technickou úrovní od elektromechanických, přes tranzistorové až s použitím integrovaných obvodů (zatímco vyspělé státy je již začínaly řídit mikroprocesory)). V současné době je obdobný stav v oblasti mini a mikropočítačů, ve vyvíjených vzorcích jsou používány zahraniční součástky, jednotlivé systémy nejsou kompatibilní atd. (viz interview v AR A3/84).

Připojíme-li k těmto problémům i výše zmíněný požadavek na průběžnou informovanost technických kádrů, spojenou s výchovou mladé generace pro práci s elektronickými obvody, zjistíme, že zcela chybí zdroj pravidelných technických informací, zaměřený na zveřejňování vybraných mikroelektronických konstrukcí a jejich aplikací v digitální a výpočetní technice.

Nahlédneme-li do seznamu současných v ČSSR vydávaných periodik, zabývajících se elektronikou (uveřejnil jej „Informační zpravodaj UTRIN příloha 7–8/83"), zjistíme, že v ČSSR není vydáván časopis s celostátní působností, určený širokému okruhu odborníků, který by se zabýval systematicky konstrukční obvodovou technikou mikroelektroniky, výpočetní techniky, digitálních i programovacích obvodů, programováním, automatizovanými a regulačními systémy, periferními obvody procesorů a počítačů, snímači, čidly, zesilovacími výkonovými a povelovými obvody atd. Existují pouze specializované publikace určené úzkému okruhu profesionálních pracovníků příslušného oboru, vydávané ve velmi omezeném nákladu a bez možnosti zakoupení ve stáncích PNS. Elektronicky zaměřeným odborníkům pak nezbývá, než přejímat konstrukce a využívat zapojení pouze ze zahraničních, do této oblasti směrovaných časopisů.

Jediným periodikem, které svým nákladem 120 tisíc výtisků řady A měsíčně a 88 tisíc výtisků řady B 6× do roka tuto mezeru částečně vyplňuje, je časopis Amatérské radio. Tím však, že jeho poslání určené registrační přihláškou, má odlišný charakter (je zaměřeno na amatérskou radiotechniku a elektroniku), je toto suplování pro potřeby rozvoje mikroelektronizace v národním hospodářství nedostačující. Redakce si plně uvědomuje naléhavost informovanosti z nových oborů elektroniky, a proto alespoň částí obsahu časopisu pokrývá stále rostoucí zájem o aplikace mikroelektroniky a výpočetní techniky.

Před dvěma roky byla proto v časopise zavedena rubrika Mikroelektronika, která vzbudila značný zájem a ohlas mezi čtenáři. Časopis se stal „podpultovým" zbožím (PNS na celém území státu nepřijímá další předplatitelské objednávky), což svědčí o zcela neuspokojené poptávce odborné veřejnosti po těchto informacích, a navíc je odebírán profesionálními pracovišti výzkumného, vývojového a konstrukčního charakteru, které jej využívají pro svou práci.

Lednové číslo časopisu (1982) přineslo rozhovor redakce s ministrem FMEP prof. ing. M. Kubátem, DrSc., ministrem spojů ing. V. Chalupou, CSc., náčelníkem spojovacího vojska MNO genpor. ing. L. Stachem a dalšími předními pracovníky v elektronice o poslání a úkolech časopisu. Z diskuse jednoznačně vyplynul rozpor mezi potřebami společnosti při rozvoji elektroniky, její popularizací a možnostmi časopisu co do rozsahu jeho obsahové náplně,

neboť začlenit všechny vyslovené požadavky do časopisu by znamenalo stránkový obsah přinejmenším zdvojnásobit. Rozhovor také ukázal, že tento svazarmovský časopis, který má dnes již 32letou historii (a 62letou jako Radioamatér) vždy byl a stále zůstává jedním z průkopníků rozvoje elektroniky v ČSSR.

Redakce si je plně vědoma uvedených skutečností, ale protože není v jejích silách provést kvantitativní změny, bude svoji pozornost na stránkách časopisu i nadále věnovat co nejširšímu záběru elektronických aplikací. **JaK**

REPRODUKTORY A REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Dr. Ing. Aleš Boleslav, CSc., Ing. Mirčo Jončev

1. Úvod

Elektroakustické měniče představují velmi rozsáhlý a po stránce teoretické i praktické náročný obor, takže v této publikaci omezeného rozsahu, i když je zaměřena pouze na akustické zářiče, není možné se zabývat danou problematikou podrobně. Půjde zde o poskytnutí základních informací nutných pro návrh a konstrukci soustav pro reprodukci akustického signálu v uzavřených obytných místnostech. S ohledem na rozsah, který je k dispozici, budou uvedeny jen základní informace a vzorce nezbytné pro výpočet, bez důkazů a odvození, které by ovšem byly pro lepší porozumění problematice účelné.

Při návrhu akustických zářičů a při nezbytné početní kontrole jejich vlastností se neobejdeme bez výpočtů, stejně jako při vyčíslení výsledků měření. Tyto výpočty však v současné době, kdy jsou mezi techniky běžné elektronické kalkulačky (často programovatelné), jistě nebudou činit potíže.

Měřicí metody a postupy pro stanovení základních konstant reproduktorů a vlastností již hotových zářičů jsou navrženy tak, aby se daly uskutečnit minimálními prostředky. Vystačí se při nich převážnou většinou s tónovým generátorem (včetně výkonového zesilovače), elektronickým voltmetrem, případně s osciloskopem, odporovou dekádou a ovšem s měřicím mikrofonem, který v současné době není ani pro amatéra nedosažitelný. Jako měřicí mikrofon lze totiž s úspěchem použít elektretový mikrofon s integrovaným zesilovačem, který se používá v četných přenosných magnetofonech. Tyto mikrofony mívají obvykle velmi dobré přenosové vlastnosti v kmitočtovém rozsahu 30 až 5000 Hz, přičemž i v oblasti 5 až 10 kHz jsou odchylky od ideálního průběhu přijatelné. Je ovšem účelné srovnat si přenosové vlastnosti zvoleného mikrofonu s vlastnostmi kvalitního mikrofonu měřicího.

Ke zjišťování přenosových vlastností vyzařovacích jednotek je ovšem nutné mít k dispozici i potřebný měřicí prostor. Ale i zde lze mnohé improvizovat. Lze měřit totiž ve volném akustickém poli, kdy je vyzařovací jednotka vestavěna v okně laboratoře (viz kapitola 10) a vyzařuje do volného prostoru. Dále v oblasti nízkých kmitočtů lze využít možností, které skýtá měření v blízkém poli hlubokotónového reproduktoru nebo vyzařovací jednotky, stejně jako měření v dostatečně utlumené místnosti, umístí-li se měřicí mikrofon do menší vzdálenosti od reproduktoru, než je její dozvuková vzdálenost.

V závěru práce jsou uvedeny základní informace o umístění reproduktorových soustav v místnosti a ovšem také o výkonu zesilovačů, který je nezbytný pro vytvoření dobrého vjemu poslouchaného hudebního signálu. Umístění reproduktorových soustav je mimořádně důležité, zejména máme-li na zřeteli reprodukci signálů o nízkých kmitočtech, a to proto, že poloha zářiče v místnosti může ovlivnit hladinu zvuku o 12 dB i více a to i bez vlivu stojatých vln, který by se měl umístěním zářiče co nejvíce omezit (což je ovšem mnohdy velmi obtížné).

Pro úplnost je účelné zamyslit se nad oprávněností pojmu „vysoce kvalitní reprodukce", krátce charakterizovaným symbolem Hi-Fi, který byl v současné době velmi podstatnou měrou degradován. V době zavedení tohoto pojmu se jednalo o kvalitní reprodukci, která měla vytvořit dojem přímého poslechu v optimálním místě koncertní síně. Oprávněnost tohoto pojmu se zvýšila zavedením stereofonie (případně kvadrofonie).

V současné době je pojem kvalitní reprodukce znehodnocen převážnou měrou způsobem snímání signálu a jeho režijním zpracováním, neboť se zejména v oblasti tzv. „pop-music" zavedla technika oddělených záznamů signálů jednotlivých hudebních nástrojů anebo skupin, stejně jako záznamu zpěvu jednotlivých sólistů, z nichž se výsledný snímek teprve dodatečně, často pracně, sestavuje. Mikrofony jsou při snímání signálu v těsné blízkosti zdrojů signálů, což ovšem často velmi zkresluje původní snímaný zvuk proti stavu, jaký je ve vzdáleném akustickém poli.

U tohoto druhu snímků se jedná o reprodukci snad představy hudebního režiséra, nikoli však o věrný zvuk.

Pokud jde o signál záměrně sestavený synteticky a také o synteticky vytvořený prostorový vjem, je věc vcelku přijatelná, protože se jedná o zvláštní záměr, svého času využitý při vytvoření takzvané „konkrétní hudby". Nepřijatelné je, pokud se tato technika snímání a kompletace hudebního signálu přenáší i do oblasti záznamu tzv. vážné hudby, která vznikla v minulosti (a vzniká i v současné době), u níž je pro správný estetický účinek nezbytný vliv přirozeného dozvukového pole koncertní síně, stejně jako vliv určitého prostorového rozložení hudebních nástrojů a nástrojových skupin.

Bez ohledu na současný, často neutěšený stav snímací techniky je nutné řešit reproduktorové soustavy včetně použitého elektronického zařízení tak, aby byly schopny vytvořit u posluchače při reprodukci optimálně pořízeného snímku co nejlepší zvukový obraz blížící se představě autora díla, minimálně narušený technickými nedokonalostmi použitého zařízení. Přitom je nutno mít na zřeteli, že skutečný milovník dobré hudby spíše toleruje drobné nedostatky technického rázu, než hrubý zásah do struktury provozovaného díla, způsobený nevhodným způsobem snímání a nevhodnou hudební režií.

2. Zdroje akustické energie a podstata jejich činnosti

Účelem reproduktoru, jakožto elektroakustického měniče, je přeměna elektrického signálu na odpovídající signál akustický, šířící se v plynném prostředí. Pro objasnění procesu přeměny elektrické energie na akustickou je účelné objasnit si, jak vzniká vlnění nesoucí akustickou energii a akustickou informaci.

Akustická energie, která je v kmitočtovém rozsahu 16 až 20 000 Hz uchem vnímána jako slyšitelný zvuk, vzniká rozkmitáním plynného prostředí, kterým se šíří. Pro vznik zvuku je charakteristický pulsující proud plynného prostředí (vzduchu) w, zvaný objemová rychlost, daný součinem rychlosti v vzduchových molekul a plochy S, kterou protéká. Platí tedy, že

$$w = Sv \; [\mathrm{m^3/s;\ m^2,\ m/s}] \quad (2.1).$$

Tento proud vzduchu může být ovlivněn kmitajícím pevným tělesem, obklopeným plynným prostředím (například membránou), nebo kmitajícím sloupcem vzduchu souvisejícím s okolním vzduchem.

Akustický signál vznikne také, přivádí-li se do volného prostoru modulovaný proud vzduchu, jehož objemová rychlost obsahuje periodickou střídavou složku.

Zdrojem akustického signálu konečně může být i horké těleso, jehož povrchová teplota periodicky kolísá.

Jedná se tedy o čtyři možné způsoby vybuzení (vzniku) akustického signálu, které mohou být aplikovány při konstrukci elektroakustických měničů.

Největší praktický význam má uspořádání zářiče, u něhož je akustický signál vyzařován kmitající membránou. Tento způsob vyzařování je aplikován jak u reproduktorů, u nichž membrána navazuje přímo na vnější okolí (u takzvaných reproduktorů přímovyzařujících), tak u reproduktorů, u nichž souvisí membrána ob-

vykle kruhového tvaru s okolím přes rozšiřující se zvukovod exponenciální, hyperbolický nebo kuželový. Pohyb membráně uděluje elektromechanický měnič, v němž je elektrická energie měněna na mechanickou.

Zdroje akustického signálu, u nichž je signál vyzařován kmitajícími stěnami zářiče, jsou běžné v hudební praxi. Takto fungují například smyčcové i jiné strunné hudební nástroje, u nichž jsou kmitajícími strunami uváděny do pohybu jejich stěny nebo takzvaná rezonanční deska. Jedná se vesměs o zdroje akustické energie přímovyzařující.

Zářiče akustické energie, u nichž se využívá kmitajícího sloupce vzduchu, nelze využít u elektroakustických měničů. Jsou však běžné u píšťal a hudebních nástrojů fungujících jako píšťaly (flétna, pikola, zobcová flétna). Jedná se také o přímovyzařující jednotky, u nichž je akustický signál vyzařován převážně ústím, případně otvory nástroje.

Modulovaný proud vzduchu se uplatňuje u elektroakustických měničů pneumatických, u nichž je průtok vzduchu modulován elektricky ovládaným ventilem, který ovládá průřez, fungující jako proměnný akustický odpor. Veškerou potřebnou energii zde dodává proudící vzduch, elektrická energie pro ovládání ventilu je z hlediska celkové energetické bilance téměř zanedbatelná.

Elektroakustický zářič zmíněného druhu se obvykle řeší s ohledem na zvětšení účinnosti jako nepřímovyzařující.

Tímto způsobem bývají občas řešeny zářiče enormních výkonů určené pro ozvučení velkých oblastí. Byly však popsány i přímovyzařující pneumatické zářiče menších výkonů, vyznačující se neobyčejně malými rozměry. Zatím se však prakticky neuplatnily.

Určitou nevýhodou pneumatických měničů je poměrně značný základní hluk, způsobený proudícím vzduchem, jehož rychlost musí být poměrně velká (nemá však překročit 1/10 rychlosti šíření zvuku).

V oboru hudebních nástrojů je však pneumatický zářič velmi rozšířen. Jako pneumatický přímovyzařující zářič pracují všechny plátkové hudební nástroje jako hoboj, klarinet, fagot, saxofon, a to ve všech používaných variantách. Patří sem i nástroje žesťové, které jsou mimoto opatřeny ještě rozšiřujícím se zvukovodem, který zlepšuje jejich účinnost a tím se zvětšuje vyzářený akustický výkon.

Tepelné měniče, k nimž patří například také takzvaný „Poulsenův zpívající oblouk" (přes stejnosměrný proud, který udržuje oblouk, je superponováno modulující střídavé napětí), byly v dřívějších letech využívány pro měřicí účely, pro absolutní cejchování mikrofonů. Měnič se skládal z tenkého platinového vodiče (anebo fólie), protékaného stejnosměrným proudem se superponovaným střídavým proudem, který způsoboval změnu akustického tlaku v okolí vodiče. V pozdějších letech byl vynalezen ionofon, u něhož byl vyhřívaný drát nahrazen doutnavým výbojem v komůrce, na níž navazoval exponenciální zvukovod. Jednalo se o vysokotónový reproduktor s mimořádně vysokým horním mezním kmitočtem, kterého mohlo být dosaženo proto, že se jednalo o zářič bezmembránový, u něhož akustická energie vznikala přímo v dutině zvukovodu, v níž obsažený plyn měl velmi malou hmotnost i tepelnou setrvačnost.

V současné době byl znovu realizován obdobný typ iontového reproduktoru, který funguje jako přímovyzařující (bez zvukovodu). Jedná se však pouze o zajímavost bez praktického významu (vzhledem k jeho malé účinnosti).

Jak již bylo řečeno, největší praktický význam v současné době mají reproduktory využívající kmitající membrány a to přímovyzařující, které jsou nejčastěji používány, a reproduktory nepřímovyzařující a tlakové, používané jednak pro vyzařování velkých akustických výkonů, jednak pro řešení kvalitních a účinných vysokotónových jednotek. Těmito druhy reproduktorů se budeme v dalším zabývat.

3. Základní pojmy a vztahy

Úvodem je účelné objasnit si některé důležité základní pojmy a vztahy, které budou používány v dalším textu:

y	výchylka kmitajícího tělesa	[m, mm]
$v = \omega y$	rychlost kmitajícího tělesa	[m/s]
$a = v\omega$	zrychlení	[m/s²]
f	kmitočet, $\omega = 2\pi f$ kruhový kmitočet	[1/s]
S	plocha kmitajícího tělesa ve směru kolmém na výchylku	[m²]
$yS = V$	objemový posuv kmitající plochy	[m³]
$w = vS$	objemová rychlost	[m³/s]
$\frac{dw}{dt}$	objemové urychlení	[m³/s²]
$z_m = \frac{F}{v}$	mechanická impedance	[Ns/m]
$F = am_m$	síla	[N]
$p = \frac{F}{S}$	tlak	[Pa]
c_0	rychlost šíření zvuku (ve vzduchu při 20 °C c = 345 m/s)	[m/s]
ϱ	specifická hmotnost vzduchu	[kg/m³]
p_0	statický tlak vzduchu (10^5 Pa)	[Pa]
$\varkappa$	Poissonova konstanta plynu ($\varkappa \doteq 1,4$)	
$z_{ak} = \frac{p}{w} = \frac{F}{vS^2} = \frac{z_m}{S^2}$	akustická impedance uvažovaná na ploše S	[Pa.s/m³]
$c_m = \frac{v}{F}$	mechanická poddajnost	[m/N]
$c_{ak} = \frac{\Delta V}{p} = c_m S^2$	akustická poddajnost	[m³/Pa]
m_m	mechanická hmotnost	[kg]
$m_{ak} = \frac{m_m}{S^2}$	akustická hmotnost	[kg/m⁴]
$c_0\varrho$	vlnový odpor vzduchu (415)	[Pa.s/m]
r_m	mechanický odpor	[Ns/m]
r_{ak}	akustický odpor	[Pa.s/m³]
V	objem	[m³, l]
$c_{ak} = \frac{V}{p_0 \varkappa}$	akustická poddajnost objemu	[m³/Pa]
$\lambda = \frac{c_0}{f}$	délka vlny akustického signálu	[m]
$Q_s = \frac{(p_{\alpha=0})}{p_s}$	činitel směrovosti zářiče	
$p_{\alpha=0}$	akustický tlak v ose zářiče	
$p^2_s = \int_0^{4\pi} p^2_\alpha d\alpha$	střední hodnota akustického tlaku	
$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0}$	vlnové číslo	[1/m]
Q_0	činitel jakosti (jakost) naprázdno elektrodynamického reproduktoru	
Q_{el}	elektrický činitel jakosti elektrodynamického reproduktoru (nakrátko)	
Q_c	celkový činitel jakosti elektrodynamického reproduktoru (nakrátko)	

POZOR!

Vracíme se tímto k údajům v AR řady B, č. 1/1984 a to sice k mapě televizních vysílačů. Volali nám do redakce pracovníci vysílače na Pradědu, že v mapě je nesprávně uveden druh polarizace u jejich vysílače – jejich vysílač 1. programu používá nikoli vertikální, ale horizontální polarizaci. Stejně je tomu u vysílače Javořice (Jihlava).

4. AKUSTICKÉ ZÁŘIČE

4.1 Bodový zářič

Nejjednodušším akustickým zářičem je bodový zářič, který je zdrojem objemové rychlosti w. Můžeme si jej představit jako pulsující kouli malých rozměrů, nebo konec tenké trubky, kterou vytéká plyn o střídavé objemové rychlosti

$$w = W\cos\omega t,$$

kde W je maximální objemová rychlost, $\omega = 2\pi f$ kruhový kmitočet, f kmitočet a t čas.

Jedná se o přímovyzařující zářič, protože plyn s objemovou rychlostí w se přímo stýká s vnějším obzduším.

Za bodový zářič můžeme považovat každý zdroj akustického signálu, jehož rozměry jsou malé proti délce vlny $\lambda = \frac{c_0}{f}$.

Tuto skutečnost je vhodné mít na zřeteli při všech úvahách o činnosti přímovyzařujícího zářiče akustické energie v oblasti nízkých kmitočtů.

Akustická energie je vyzařována všemi směry. Akustický tlak ve volném prostoru ve vzdálenosti ξ od bodového zdroje je

$$p_{(4\pi)} = \varrho\omega\frac{w}{4\pi\xi}\ [\text{Pa; kg/m}^3, \frac{1}{s}, \text{m}^3/\text{s, m}] \quad (4.1).$$

Ze vztahu je patrno, že se při konstantní objemové rychlosti zvětšuje akustický tlak přímo úměrně s kmitočtem, tedy 6 dB/ /oktávu. Při konstantním urychlení objemové rychlosti dw/dt = konst je pak akustický tlak p kmitočtově nezávislý. To je další skutečnost, která charakterizuje činnost všech přímovyzařujících zdrojů akustického signálu v oblasti nízkých kmitočtů.

Máme-li na zřeteli, že intenzita akustické energie i ve volném akustickém poli je

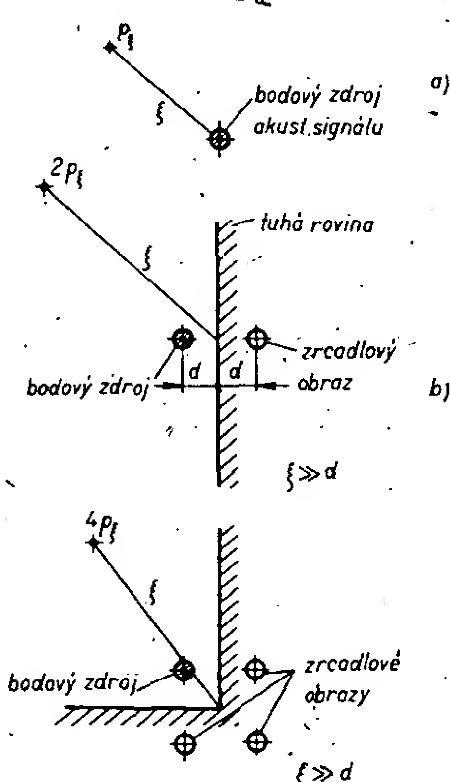
$$i = pv = \frac{p^2}{c\varrho} \quad (4.2),$$

je vyzářený akustický výkon zdroje

$$N_{ak(4\pi)} = \frac{p_\xi^2}{c\varrho}4\pi\xi^2\ [\text{W; Pa, m/s, kg/m}^3\text{, m}] \quad (4.3),$$

nebo, je-li p_1 akustický tlak ve vzdálenosti 1 m a ξ = 1 m,

$$N_{ak(4\pi)} = \frac{p_1^2}{c\varrho}4\pi \quad (4.4).$$



Obr. 4.1. Vliv okolí na vyzařování bodového zdroje; a) vyzařování do volného prostoru (do 4 π), b) vyzařování do poloprostoru (do 2 π), c) vyzařování do čtvrtprostoru (do π) (kvadrantu)

To platí pro uspořádání podle obr. 4.1a.

Je-li bodový zdroj objemové rychlosti umístěn v těsné blízkosti nekonečné tuhé roviny (anebo přímo v této rovině), jak patrno z obr. 4.1b, a vyzařuje tedy do prostoru, je akustický tlak ve vzdálenosti ξ od zdroje

$$p_{\xi(2\pi)} = \varrho\omega\frac{w}{2\pi\xi} \quad (4.5),$$

tedy dvojnásobný oproti prvnímu případu. Dvojnásobný je také vyzářený akustický výkon

$$N_{ak(2\pi)} = 2N_{ak(4\pi)} \quad (4.6).$$

Situaci si lze vyjádřit tak, že se současně s originálním zdrojem uplatňuje aktivně i jeho zrcadlový obraz, obr. 4.1b.

Analogický je případ u zdroje umístěného ve čtvrtprostoru, v blízkosti průsečíku dvou tuhých rovin (obr. 4.1c), kdy je energie vyžadována do úhlu π radiánů a

$$p_{\xi(\pi)} = \varrho\omega\frac{w}{\pi} = 4p_{(4\pi)} \quad (4.7)$$

a vyzářený výkon je čtyřnásobný ve srovnání s výkonem vyzářeným do volného prostoru. V tomto případě se jedná o uplatnění tří zrcadlových obrazů zdroje (4)

$$N_{ak(\pi)} = 4N_{ak(4\pi)} \quad (4.8).$$

Podobná situace nastává u všech druhů zářičů, pokud jsou jejich rozměry malé ve srovnání s vlnovou délkou akustického signálu.

4.2 Pulsující koule

Teoreticky nejjednodušším zářičem akustické energie konečných rozměrů je pulsující koule, jejíž poloměr R se periodicky mění tak, že je radiální rychlost v každého jejího povrchového bodu stejná. Je-li obvod zářiče malý ve srovnání s délkou vlny λ

$$\frac{2\pi R}{\lambda} << 1 \quad (4.10),$$

lze považovat kouli za bodový zdroj se všemi jeho vlastnostmi.

Povrch pulsující koule umístěné v plynném prostředí je zatížen akustickou impedancí

$$z_v = \frac{c\varrho}{4\pi R^2}(A + jB) = \frac{c\varrho}{S}(A + jB) \quad (4.11),$$

jejíž složky A a B v závislosti na kmitočtu, popř. na $\frac{2\pi R}{\lambda} = kR$ jsou patrné z grafu na obr. 4.2. Přitom

$$A = \frac{(kR)^2}{1+(kR)^2} \quad (4.12)$$

a

$$B = \frac{kR}{1+(kR)^2} \quad (4.13)$$

(A a B jsou takzvané normované akustické impedance).

V oblasti nízkých kmitočtů, kdy $\frac{2\pi R}{\lambda} << 1$, je $A \doteq (kR)^2$, zatímco imaginární složka má charakter reaktance hmotnosti m spolukmitajícího vzduchu, kdy

$$m_v = \frac{\varrho}{4\pi R} = \varrho\,.0{,}25\frac{1}{\pi R}.$$

Při konstantní rychlosti radiálního kmitání povrchu zářiče se akustický tlak v jeho okolí zvětšuje se směrnicí 6 dB/okt, tedy přímo úměrně s kmitočtem.

V oblasti kmitočtů, při nichž je délka vlny λ podstatně menší než obvod koule

$$\frac{2\pi R}{\lambda} >> 1 \quad (4.14),$$

je akustický tlak ve vzdálenosti ξ od koule již kmitočtově nezávislý a je

$$p = c\varrho\frac{R}{\xi}v \quad (4.15).$$

Akustické pole je ovšem vždy kulové a zářič má činitel směrovosti Q_s = 1, nezávisle na kmitočtu.

Kulový zářič se používá zatím převážnou měrou jen pro měřicí účely. V poslední době však pracuje firma AUDAX na zářiči ve formě části pulsující koule (kulovém vrchlíku), u něhož má být využit piezoelektricky aktivní polymer (polyvinylidenfluorid).

4.3 Membrána umístěna v nekonečné ozvučnici

Pístově kmitající membrána umístěna v nekonečné tuhé ozvučnici se chová v oblasti kmitočtů, kdy je její obvod menší než délka vlny, jako bodový zdroj, který vytvoří ve vzdálenosti ξ při objemové rychlosti w akustický tlak

$$p = \varrho\omega\frac{w}{2\pi\xi} \quad (4.5).$$

Je-li urychlení membrány a, je akustický tlak p kmitočtově nezávislý

$$p = \varrho\frac{aS}{2\pi\xi} \quad (4.16),$$

což platí bez omezení (i pro délky vlny menší než obvod membrány). S rostoucím kmitočtem však vzrůstá činitel směrovosti z původní hodnoty 2 (do $\frac{2\pi R}{\lambda} \leqq 1$) na

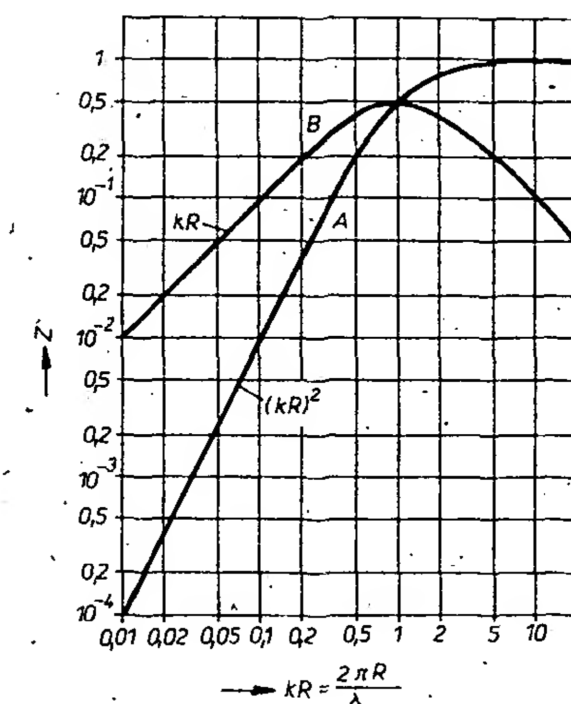
$$Q_s = \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (4.17),$$

jak je patrno z obr. 4.3. Z definice činitele směrovosti a vztahu (4.17) vyplývá, že se u pístové membrány kmitající s konstantním urychlením zmenšuje při kmitočtově nezávislém akustickém tlaku v její ose vyzářený výkon nepřímo úměrně s kmitočtem, a to u kmitočtů, při nichž je

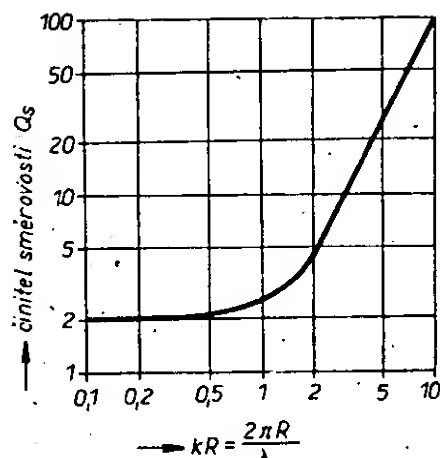
$$\frac{2\pi R}{\lambda} > 1.$$

Vrcholový úhel ψ směrové charakteristiky (obr. 4.4) je přibližně

$$\psi \doteq 2\arccos\left(1 - \frac{2}{Q_s}\right) \quad (4.18),$$



Obr. 4.2. Průběh složek normované vyzařovací impedance zářiče fungujícího jako pulsující koule

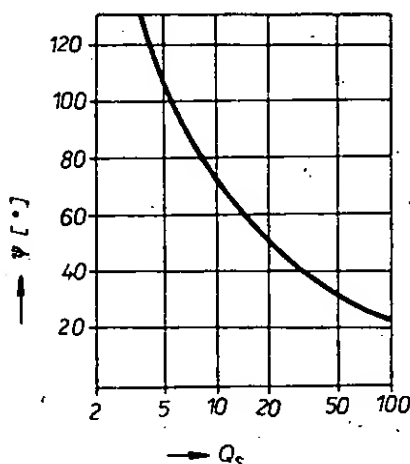


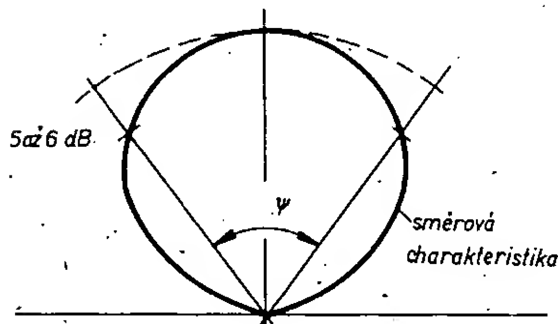
Obr. 4.3. Závislost činitele směrovosti pístové membrány umístěné v nekonečné rovině při vyzařování do poloprostoru na (2πR/λ) = kR

přičemž při odchylce $\psi/2$ od osy zářiče se úroveň snižuje asi o 5 až 6 dB.
Přitom ve středu membrány je v oblasti nízkých kmitočtů akustický tlak

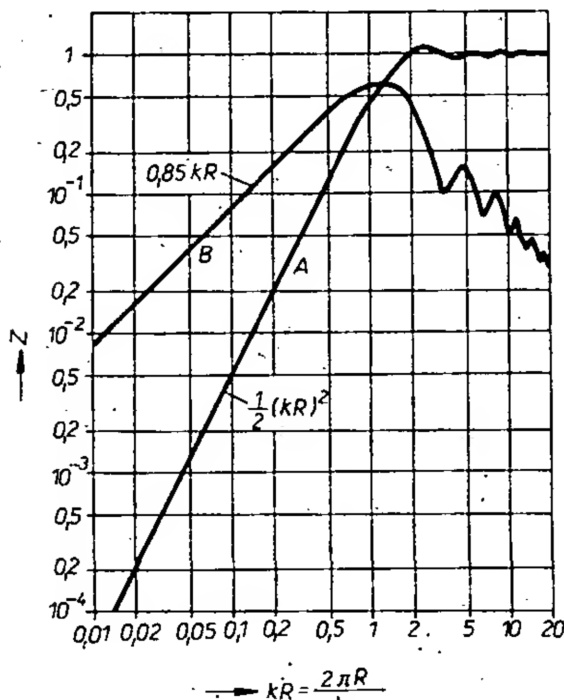
$$p_b = v_m \varrho \omega R \qquad (4.19).$$

Akustický tlak v ose membrány ve vzdálenosti ξ vyjádřený tlakem v blízkém poli je tedy (při vyzařování do poloprostoru)





Obr. 4.4. Přibližná velikost vrcholového úhlu ψ směrové charakteristiky pístové membrány umístěné v nekonečné rovině



Obr. 4.5. Průběh složek normované vyzařovací impedance jedné strany pístové membrány umístěné v nekonečné rovině při vyzařování do poloprostoru (2 π)

$$p_\xi = p_b \frac{R}{2\xi} \qquad (4.20).$$

Souvislosti mezi akustickým tlakem v blízkém a vzdáleném poli lze využít při měření reproduktorů v oblasti nízkých kmitočtů, jak bude uvedeno v kapitole o měření.

Mechanická vyzařovací impedance pístové membrány umístěné v tuhé rovině je

$$z_m = c_0 \varrho S (A + jB) \qquad (4.21)$$

a odpovídající akustická impedance

$$z_{ak} = \frac{c_0 \varrho}{S} (A + jB). \qquad (4.22).$$

Průběh složek A a B v závislosti na kmitočtu je na obr. 4.5.

Jak je patrno z grafu, blíží se reálná složka normované vyzařovací impedance v oblasti vysokých kmitočtů jedničce, zatímco hodnota B klesá k nule.
V oblasti nízkých kmitočtů je

$$A \doteq \frac{(kR)^2}{2} \qquad (4.23)$$

a

$$B \doteq \frac{8}{3\pi} \frac{2\pi R}{\lambda} \doteq 0{,}85 \frac{R}{c_0} \omega \qquad (4.24).$$

Imaginární složka vyzařovací impedance má charakter reaktance hmotnosti m_v spolukmitajícího vzduchu, která je

$$m_v = \varrho \,.\, 0{,}85 \,\pi R^3 \qquad (4.25)$$

což je hodnota mechanická a

$$m_{vak} = \varrho \,.\, 0{,}85 \frac{1}{\pi R} \qquad (4.26),$$

což je hodnota akustická.

U membrány vestavěné v nekonečné ozvučnici jsou ovšem zatíženy obě její strany, takže celková hmotnost spolukmitajícího vzduchu je pak dvojnásobná

$$m_{vak} = \varrho \,.\, 1{,}7 \frac{1}{\pi R} = \frac{0{,}65}{R} \; [\mathrm{kg/m^4; m}] \qquad (4.27).$$

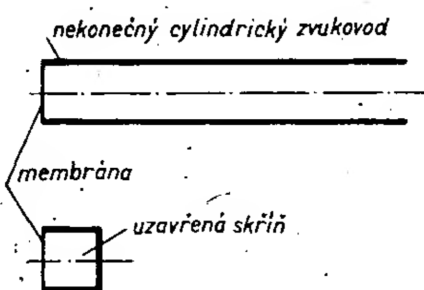
4.4 Membrána umístěna na konci cylindrického zvukovodu nebo ve stěně uzavřené skříňky

Membrána umístěna ve volném prostoru, jejíž zadní strana je zakryta a nevyzařuje do okolí (obr. 4.5), v oblasti nízkých kmitočtů, kdy je její obvod malý ve srovnání s vlnovou délkou vyzářeného signálu ($\frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1$), vyzařuje do celého prostoru, podobně jako pulsující koule o stejné ploše. Činitel směrovosti je v tomto případě roven 1 a hodnota akustického tlaku ve vzdálenosti ξ od zářiče odpovídá vztahu (4.1).

V oblasti vyšších kmitočtů, kdy

$$\frac{2\pi R}{\lambda} > 2,$$

se mění vyzařování z všesměrového na



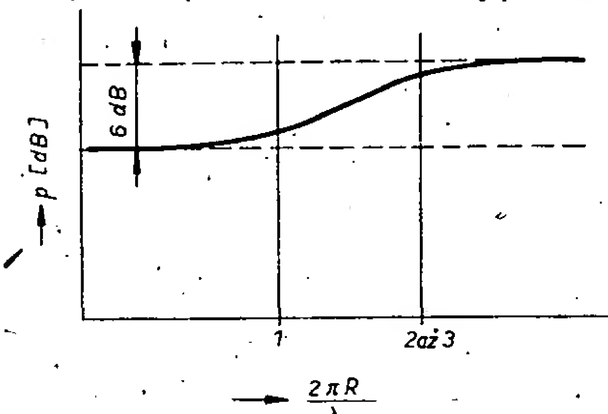
Obr. 4.6. Pístová membrána umístěna buď na konci nekonečného cylindrického zvukovodu anebo ve stěně uzavřené skříňky, vyzařující do celého prostoru (4 π)

směrové a akustický tlak v ose membrány bude

$$p = \varrho \omega \frac{w}{2\pi\xi} \qquad (4.28),$$

přičemž směrové vlastnosti jsou obdobné jako u membrány umístěné v nekonečné ozvučnici.

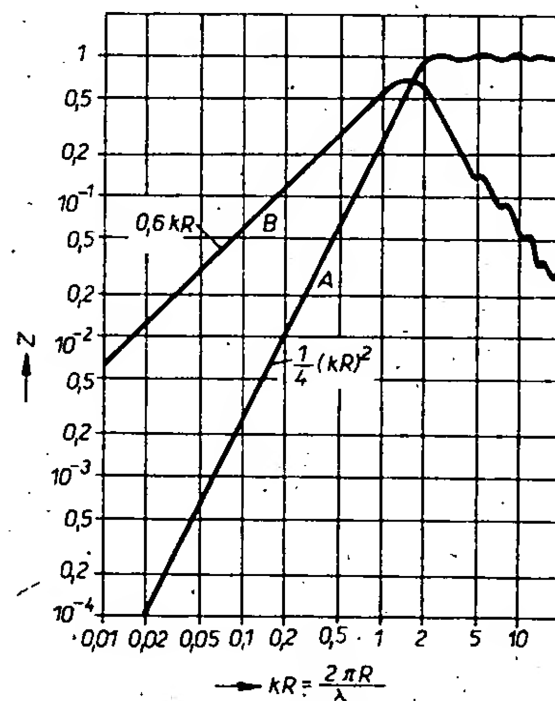
Kmitá-li tedy pístová membrána konstantním urychlením v uspořádání podle obr. 4.6, je výsledná kmitočtová charakteristika v její ose kmitočtově závislá a má průběh podle obr. 4.7. Zlomy průběhů



Obr. 4.7. Kmitočtový průběh akustického tlaku v ose pístově kmitající membrány, situované podle obr. 4.6

nastávají při kmitočtech, při nichž přechází kulová směrová charakteristika ve směrovou, tedy $\frac{2\pi R}{\lambda} = 1$ a $\frac{2\pi R}{\lambda} = 2$ až 3. V oblasti vyšších kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} > 2$ až 3) se totiž membrána sama uplatňuje jako ozvučnice a chová se tedy přibližně jako pístová membrána umístěna v dostatečně rozměrné ozvučnici.

Kmitočtový průběh složek vyzařovací impedance membrány umístěné na konci cylindrického zvukovodu je na obr. 4.8.



Obr. 4.8. Průběh složek normované vyzařovací impedance pístově kmitající membrány, umístěné na konci nekonečného zvukovodu anebo ve stěně uzavřené skříňky (viz obr. 4.6)

V oblasti nízkých kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} < 1$) je

$$A = \left(\frac{kR}{2}\right)^2 \qquad (4.29)$$

a

$$B = \omega \,.\, 0{,}6 \frac{R}{c_0} \qquad (4.30).$$

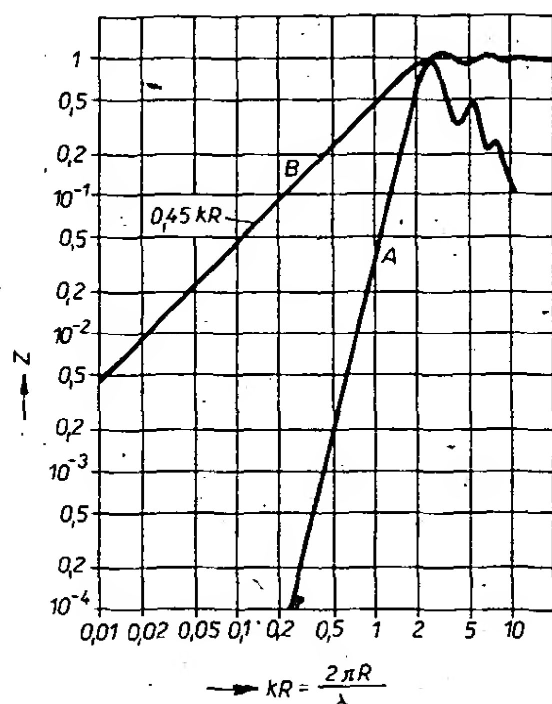
Hmotnost spolukmitajícího vzduchu tedy je $m_{vzd,m} = \varrho \cdot 0{,}6\pi R^3$ a její akustická hodnota

$$m_{ak} = \varrho \cdot 0{,}6 \frac{1}{\pi R} \qquad (4.31).$$

V oblasti vysokých kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} < 1$) je vyzařovací impedance stejná jako u membrány umístěné v nekonečné ozvučnici, stejně jako hmotnost, která se zmenšuje k nule.

4.5 Membrána kmitající ve volném prostoru

Poslední typ jednoduchého zářiče akustického signálu s pístovou membránou je na obr. 4.9. Jedná se o membránu bez ozvučnice, kmitající ve směru své osy.



Obr. 4.9. Průběh složek normované vyzařovací impedance pístově kmitající membrány bez ozvučnice, uvažované na její jedné straně

Složky vyzařovací impedance zatěžující jednu stranu membrány odpovídají grafu na témže obrázku.

Složka normované reálné vyzařovací impedance v oblasti nízkých kmitočtů je přibližně

$$A = \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{1}{40} \qquad (4.32),$$

akustická hmotnost spolukmitajícího vzduchu platící pro celou membránu (obě její strany) je přitom

$$m_{ak} \doteq 0{,}43\varrho \frac{1}{\pi R} = \frac{0{,}16}{R} \ [\mathrm{kg/m^4;\ kg/m^3}] \qquad (4.33)$$

(přibližně polovina spolukmitající hmotnosti vzduchu zatěžující jednu stranu pístové membrány, umístěné v nekonečné rovině).

Normovaná velikost reálné složky vyzařovací impedance volné membrány nabývá hodnoty 1 od kmitočtu $f = \frac{3c_0}{2\pi R}$. Do tohoto kmitočtu stoupá osová kmitočtová charakteristika tohoto zářiče se směrnicí 6 dB/okt, aby v oblasti nad tímto kmitočtem byla kmitočtově nezávislá (pokud je urychlení membrány konstantní).

Tab. 1.

Umístění membrány	Vyzařování do	Úhel vyzařování	Činitel směrovosti	Složky normované vyzařovací impedance A	B	Akustický tlak ve vzdálenosti ξ při objemové rychlosti zdroje w	Akustický tlak v difúzním poli
Na konci cylindrického zvukovodu anebo v malém pouzdru	plného prostoru	4π	1	$\frac{1}{4}(kR_a)^2$	$0{,}6kR_a$	$w\frac{1}{2}\frac{f\varrho}{\xi}$	$w\frac{f\varrho}{r_d}\cdot\frac{1}{2}$
V nekonečné rovině	poloprostoru	2π	2	$\frac{1}{2}(kR_a)^2$	$0{,}85kR_a$	$w\frac{f\varrho}{\xi}$	$w\frac{f\varrho}{r_d}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}}$
V průsečíku dvou rovin	čtvrt-prostoru (kvadrantu)	π	4	$(kR_a)^2$	$1{,}2kR_a$	$w2\frac{f\varrho}{\xi}$	$w\frac{f\varrho}{r_d}\cdot 1$
V průsečíku tří rovin	1/8 prostoru	$\pi/2$	8	$2(kR_a)^2$	$1{,}7kR_a$	$w4\frac{f\varrho}{\xi}$	$w\frac{f\varrho}{r_d}\cdot\sqrt{2}$

Platí pro $kR_a < 1$

Směrové charakteristiky tohoto typu zářiče mají do $f = 3c_0/2\pi R$ tvar osmičky, která se skládá ze dvou kružnic (jde o typický zářič prvního řádu). Se zvyšujícím se kmitočtem se osmička zužuje a směrovost zářiče vzrůstá.

4.5.1 Vliv okolí na vyzařování pístově kmitající membrány [3]

Vyzařování zdrojů akustické energie (akustických zářičů) je do značné míry ovlivněno jejich okolím. To je patrné již z rozdílných vlastností pístových membrán nebo bodových zdrojů umístěných ve volném bezodrazovém prostoru a v blízkosti tuhé roviny, případně několika rovin. Pro osvětlení vlivu umístění zářiče v prostoru je sestavena tab. 1, v níž jsou u každého jednoduchého zářiče uvedeny reálné vyzařovací impedance; hmotnost spolukmitajícího vzduchu a akustický tlak ve vzdálenosti ξ od zdroje signálu při dané objemové rychlosti w zářiče. Pro úplnost je uveden také činitel směrovosti, jehož velikost je třeba mít na zřeteli například při stanovení hladiny akustického tlaku, který vznikne v difúzním poli v uzavřeném prostoru, jsou-li rozměry tohoto prostoru dostatečně velké ve srovnání s vlnovou délkou signálu a je-li absorpce jeho stěn dostatečná.

V posledním sloupci jsou pro informaci uvedeny akustické tlaky v difúzním poli uzavřeného prostoru dostatečných rozměrů (rozumí se při kmitočtech, při nichž membrána vyzařuje jako bodový zdroj, tedy při $2\pi R/\lambda < 1$, je-li dozvuková vzdálenost uvažovaného prostoru r_d. Stejné vztahy platí i pro bodový zářič.

4.6 Zvukovody [2], [3], [4]

Zvukovody se používají u nepřímovyzařujících reproduktorů pro zvětšení akustické zátěže membrány a tím ke zlepšení jejich účinnosti. Vhodným tvarem zvukovodu a jeho ústí lze účelným způsobem ovlivnit i tvar směrové charakteristiky.

Zvukovody jsou trubice s dostatečně tuhými stěnami, jejichž průřez je buď konstantní anebo zvětšující se podle určitého zákona od jeho vstupu (obr. 4.10). Délka zvukovodu musí být volena tak, aby se jeho vstupní impedance blížila impedanci, kterou by měl tentýž zvukovod nekonečně dlouhý. Podobného efektu se u zvukovodu konečné délky dosáhne tím, že se jeho ústí zatíží jeho charakteristickou impedancí (nejlépe vyzařovací impedancí tohoto ústí u rozšiřujících se zvukovodů).

Nejjednodušším druhem zvukovodu je zvukovod válcový, jehož charakteristická impedance je

$$Z_{ak} = c_0\varrho / S \qquad (4.34),$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku, ϱ specifická hmotnost vzduchu a S průřez zvukovodu. Tento druh zvukovodu se používá pouze pro přenos akustické energie například z membrány na vstup rozšiřujícího se zvukovodu.

Pro přizpůsobení větší impedance zdroje akustického signálu (například membrány) akustické impedanci vzduchu je nutný zvukovod se zvětšujícím se průřezem, jehož výstupní průřez musí být volen tak, aby se vyzařovací impedance ústí blížila $\frac{c\varrho}{S}$. To může být splněno pouze tehdy, je-li $\frac{2\pi R_{výst}}{\lambda} \to 1$, tedy kdy normovaná impedance průřezu ústí se blíží 1 – a to je kritérium pro volbu potřebné délky zvukovodu.

4.6.1 Exponenciální zvukovod

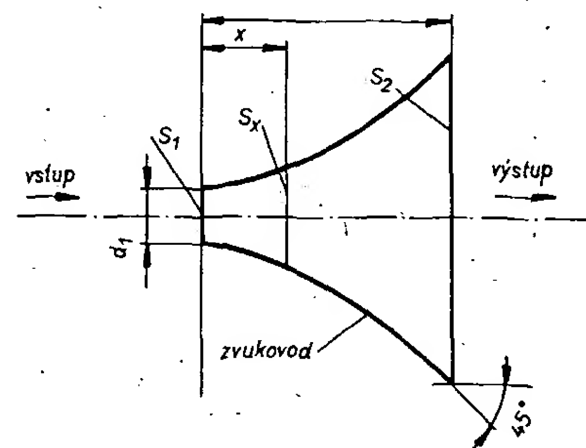
Průřez exponenciálního zvukovodu (obr. 4.10) v závislosti na pořadnici x uvažované od jeho vstupního průřezu S_1 je dán vztahem

$$S_x = S_1 e^{gx} \qquad (4.35),$$

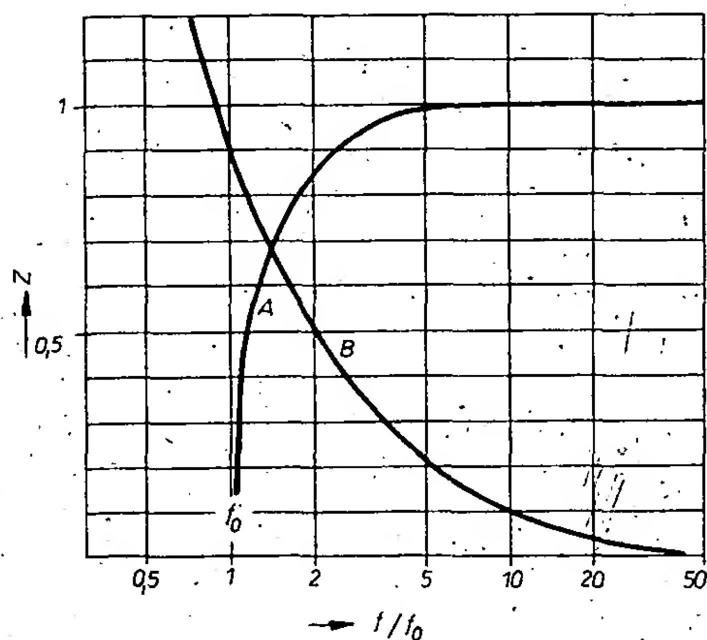
kde g je tzv. exponent zvukovodu.

Akustická vstupní impedance exponenciálního zvukovodu je dána výrazem

$$Z = \frac{c\varrho}{S}(A + jB).$$



Obr. 4.10. Rozšiřující se zvukovod vhodný pro přizpůsobení vyzařovací impedance pístově kmitající membrány na vnější ovzduší



Obr. 4.11. Průběh složek normovaných vstupních impedancí exponenciálního zvukovodu v závislosti na kmitočtu

Průběh složek A a B je patrný z grafu na obr. 4.11. Je-li f_0 kmitočet, při němž se $A \to 0$, platí, že

$$A = \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2} \quad (4.36)$$

a

$$B = \frac{f_0}{f} \quad (4.37).$$

Přitom je kmitočet f_0, tzv. kritický kmitočet zvukovodu, dán vztahem

$$f_0 = g\frac{c_0}{4\pi} \quad [\text{Hz; 1/m; m/s}] \quad (4.38).$$

Jak je patrno, je kritický kmitočet zvukovodu závislý pouze na jeho tvaru.

U zvukovodu konečné délky l je kmitočtový průběh jeho vstupní impedance zvlněný a to tím více, čím je l menší ve srovnání s délkou vlny λ. Je-li délka zvukovodu taková, že úhel rozevření zvukovodu je větší než 90° (tedy úhel α = 45° – viz obr. 4.10), blíží se jeho vstupní impedance impedanci, jakou by měl nekonečně dlouhý zvukovod. K tomu dojde tehdy, je-li výstupní průměr zvukovodu

$$d_2 = \frac{4}{g} \quad \left[\text{m}; \frac{1}{\text{m}}\right] \quad (4.39).$$

Minimální délka zvukovodu pak je

$$l = \frac{1}{g}\ln\frac{S_2}{S_1} = \frac{2}{g}\ln\frac{d_2}{d_1} \quad (4.40).$$

4.6.2 Hyperbolický zvukovod

Plocha průřezu S_x tohoto zvukovodu v závislosti na vzdálenosti x od jeho vstupu je dána rovnicí

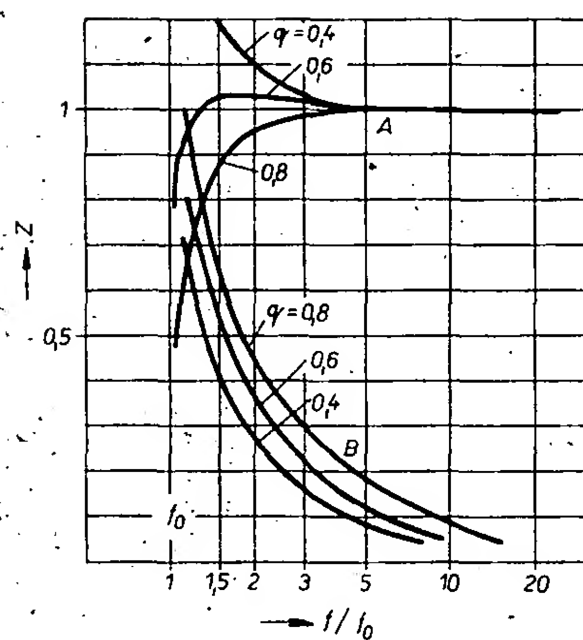
$$S = S_1\left(\cosh\frac{gx}{2} + q\sinh\frac{gx}{2}\right)^2 \quad (4.41).$$

Při konstantě $q < 1$ je délka l tohoto zvukovodu menší než délka exponenciálního zvukovodu. Výstupní průřez zvukovodu S_2 je ovšem stejný jako u zvukovodu exponenciálního.

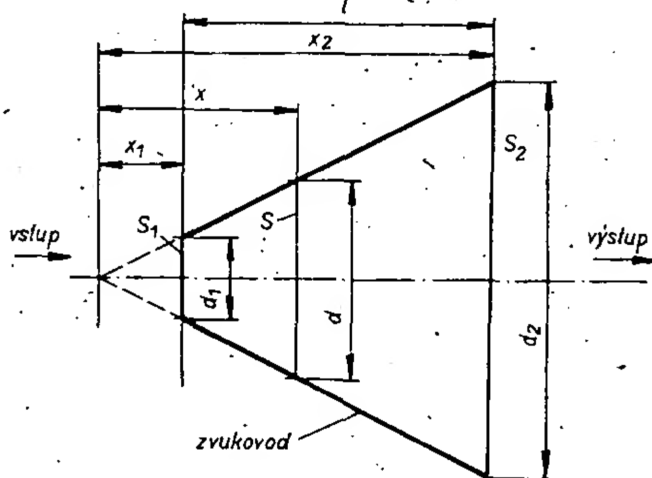
Další předností tohoto zvukovodu je to, že jeho vstupní impedance dosáhne jmenovité velikosti při podstatně nižším kmitočtu, než u zvukovodu exponenciálního (viz obr. 4.12).

4.6.3 Kuželový zvukovod

Nejjednodušší druh zvukovodu co do tvaru je zvukovod kuželový, který však ze



Obr. 4.12. Průběh složek normovaných vstupních impedancí hyperbolického zvukovodu v závislosti na kmitočtu pro různé hodnoty konstanty q



Obr. 4.13. Kuželový zvukovod

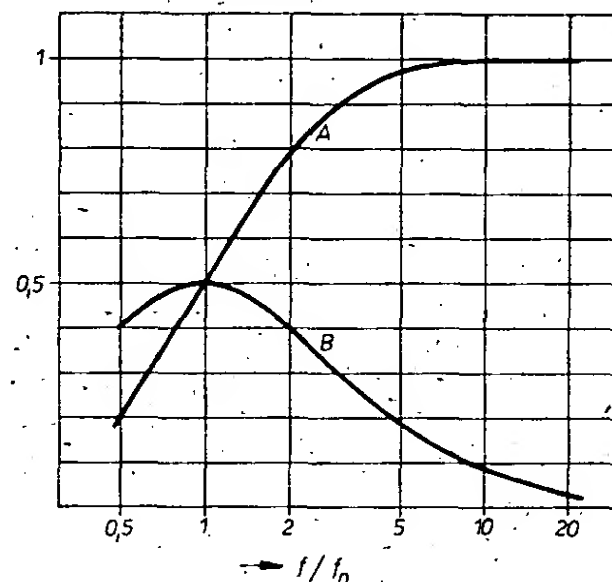
všech doposud popsaných druhů vychází nejdelší. Jeho základní uspořádání je patrné z obr. 4.13.

Plocha průřezu S zvukovodu v místě x je

$$S = \left(\frac{x}{x_1}\right)^2 S_1, \quad (4.42).$$

Při kmitočtu $f_0 = \dfrac{c_0}{2\pi x_1}$ je absolutní hodnota vstupní normované impedance rovna $\dfrac{1}{\sqrt{2}}$.

Průběh normovaných hodnot vstupní impedance zvukovodu v závislosti na kmitočtu je patrný z obr. 4. 14. Protože průměr vstupního průřezu zvukovodu má být $\pi d_2 = \lambda_1$, a z toho $d_2 = 2x_1$, je potřebná délka zvukovodu



Obr. 4.14. Průběh složek normovaných vstupních impedancí kuželového zvukovodu v závislosti na kmitočtu

$$l = \frac{c_0}{2\pi f_0}\left(\frac{d_2}{d_1} - 1\right) \quad (4.43).$$

Vrcholový úhel směrové charakteristiky se v oblasti vyšších kmitočtů blíží vrcholovému úhlu zvukovodu.

4.7 Zhodnocení základních typů akustických zářičů

Největší praktický význam pro vyzařovací jednotky určené pro kvalitní reprodukci akustického signálu v bytových prostorách mají přímovyzařující měniče a to především pro oblast signálů o nízkých a středních kmitočtech. Jejich předností jsou jejich relativně malé rozměry.

Vysokotónové zářiče se řeší částečně jako přímovyzařující (velmi často s membránami ve tvaru kulového vrchlíku), ale také jako nepřímovyzařující, případně tlakové.

Vedle klasicky řešených měničů se začínají uplatňovat reproduktory piezoelektrické a elektrodynamické páskové, případně elektrodynamické s plochou cívkou, napařenou na tenké membráně, zhotovené z tenké nevodivé fólie. Nutno se zmínit také o piezoelektrických měničích, v nichž je použita membrána zhotovená z piezoelektricky aktivní fólie z polyvinylidenfluoridu, jejichž vývojem se zabývá několik významných firem.

5. Druhy reproduktorů, jejich funkce a vlastnosti

Reproduktory lze rozdělit podle způsobu vyzařování na dva základní druhy a to přímovyzařující a nepřímovyzařující.

U přímovyzařujících reproduktorů, které představují v podstatě některé ze základních měničů, o nichž byla řeč v kapitole 4, navazuje jejich membrána bezprostředně na prostředí, do něhož je akustická energie vyzařována. Tyto reproduktory mají obvykle malou účinnost, nepřekračující několik desetin procent.

U nepřímovyzařujících reproduktorů je vložen mezi kmitající membránu elektroakustického měniče a prostředí zvukovod, případně doplněný pomocnými akustickými obvody, umožňující zvětšené zatížení membrány vyzařovací impedancí. Účinnost těchto reproduktorů může dosáhnout i několika desítek procent, obvykle však v menším kmitočtovém rozsahu.

Jako přímovyzařující, případně nepřímovyzařující reproduktory mohou působit i měniče bezmembránové, například pneumatické anebo tepelné. U pneumatického měniče nese energii proud vzduchu, jehož průtoková rychlost je modulována. U tepelného měniče akustický rozruch vzniká přívodem tepelné energie, která způsobuje v daném prostoru objemové změny vzduchu ovlivňující objemovou rychlost vzduchu proudícího z prostoru měniče. Typickým měničem tohoto druhu je například ionofon [8].

V současné době mají největší praktický význam reproduktory elektrodynamické cívkové přímo i nepřímovyzařující, menší pak elektrodynamické páskové, v poslední době jejich varianta v provedení s plochou cívkou, dále velkoplošné reproduktory elektrostatické (největší význam v této oblasti mají reproduktory firmy QUAD) a konečně neobyčejně zají-

mavé a důmyslně řešené reproduktory piezoelektrické firmy MOTOROLA.

Základní pojmy týkající se reproduktorů jsou uvedeny v úvodní části ČSN 36 8261 až 36 8263. Pro úplnost jsou zde zopakovány nejdůležitější z nich, které v dalším textu budou používány:

Akustická osa reproduktoru je u osově symetrických reproduktorů shodná s jejich geometrickou osou (u kruhových a eliptických reproduktorů prochází středem membrány a je na ni kolmá). U speciálních reproduktorů ji určuje zpravidla výrobce.

Ústí reproduktoru je plocha, z níž vystupuje při činnosti reproduktoru akustická vlna. U přímovyzařujících reproduktorů je to rovina proložená účinnou plochou membrány, případně jejími okraji, u nepřímovyzařujícího reproduktoru je to výstupní plocha zvukovodu, která může být i zakřivená.

Referenční bod reproduktoru je průsečík akustické osy reproduktoru s plochou ústí reproduktoru.

Jmenovitá impedance reproduktoru je nejmenší absolutní velikost jeho vstupní elektrické impedance v pásmu kmitočtů, pro něž je určen.

Standardní příkon se určí z přípustného efektivního napětí U na svorkách reproduktoru a činného odporu, rovného co do velikosti absolutní hodnotě jmenovité impedance Z_j reproduktoru.

Je dán vztahem $P = U^2/|Z_j|$.

Charakteristická citlivost reproduktoru je průměrná hodnota efektivního akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu (obvykle 250 až 4000 Hz) v akustické ose reproduktoru, měřená ve vzdálenosti 1 m od jeho referenčního bodu, při vyzařování do volného prostoru a standardním příkonu 1 VA. Vyjadřuje se v Pa nebo v hladině charakteristické citlivosti nad referenční hladinou 20 µPa. Udává se obvykle u reproduktoru umístěného ve standardní deskové ozvučnici.

Rezonanční kmitočet reproduktoru je nejnižší rezonanční kmitočet reproduktoru, při němž nabývá jeho vstupní impedance maximální velikosti. Udává se obvykle u elektrodynamických přímovyzařujících reproduktorů.

Kmitočtová charakteristika reproduktoru je závislost hladiny akustického tlaku v určitém definovaném bodě před reproduktorem, při konstantním napětí na jeho svorkách, znázorněná obvykle grafem v ortogonálních souřadnicích. Udává se obvykle pro bod v ose reproduktoru a body v různých směrech, odchýlených od této osy.

U přímovyzařujících reproduktorů se obvykle udává při jejich umístění ve standardní anebo nekonečné ozvučnici (při vyzařování do poloprostoru).

Směrová charakteristika reproduktoru je závislost akustického tlaku před reproduktorem na úhlu, který svírá spojnice referenčního bodu reproduktoru a bodu, v němž je měřen akustický tlak, s osou reproduktoru, při daném kmitočtu a příkonu a stálé vzdálenosti od referenčního bodu.

Akustický výkon reproduktoru je celkový vyzářený akustický výkon reproduktoru při dané konstelaci reproduktoru (při vyzařování do poloprostoru anebo plného prostoru) a daném příkonu.

Standardní účinnost reproduktoru je poměr celkového vyzářeného akustického výkonu reproduktoru k jeho standardnímu příkonu.

Činitel směrovosti reproduktoru (Q_s) je poměr vypočteného akustického výkonu reproduktoru pro případ všesměrového vyzařování, při němž se vychází z akustického výkonu měřeného v jeho ose, ke skutečnému vyzářenému akustickému výkonu.

Index směrovosti reproduktoru je činitel směrovosti vyjádřený v decibelech ($I = 10 \log Q_s$).

Činitel harmonického zkreslení reproduktoru je poměr efektivní hodnoty akustického tlaku všech harmonických složek, počínaje řádem 2, k průměrné hodnotě první harmonické složky uvažované v daném kmitočtovém pásmu reproduktoru.

Činitel harmonického zkreslení se uvádí buď v procentech anebo v dB.

Subharmonické tóny jsou signály o kmitočtu f/n ($n = 2, 3, 4 \ldots$), kdy f je kmitočet budicího elektrického signálu přivedeného na svorky reproduktoru.

Pazvuky jsou nežádoucí složky ve výstupním akustickém signálu sluchem snadno postřehnutelné, které mají obvykle charakter nelineárního zkreslení harmonickými složkami vyšších řádů, projevující se jako drnčení a šelesty.

5.1 Přímovyzařující reproduktory

V současné době je při konstrukci běžných vyzařujících jednotek nejčastěji používán přímovyzařující reproduktor s elektrodynamickým elektromechanickým měničem. Akustická energie je vyzařována membránou, která v oblasti nízkých a částečně i středních kmitočtů kmitá přibližně pístově. Jedná se v principu o jeden ze základních typů elektroakustických zářičů. Vzhledem k tomu, že akustická impedance kmitacího systému reproduktoru (daná v oblasti vyšších kmitočtů reaktancí jeho hmotnosti) je podstatně větší než jeho vyzařovací impedance, je účinnost elektrodynamických přímovyzařujících reproduktorů poměrně malá a mimo jejich základní rezonanci nepřekročí několik desetin procent (zřídka několik procent).

Nespornou předností elektrodynamických přímovyzařujících reproduktorů jsou jejich malé rozměry ve srovnání s délkou vlny vyzářeného akustického signálu, jejich jednoduchost, malá náročnost na údržbu a spolehlivost (pokud ovšem nejsou neúnosně přetěžovány).

Podstatnou částí elektrodynamického reproduktoru je jeho membrána, pevně spojená s formerem, nesoucím kmitací cívku, která tvoří ve spojení s radiálním magnetickým polem v mezeře magnetického obvodu elektromechanický měnič, způsobující axiální pohyb membrány. Schematický nákres elektrodynamického reproduktoru běžného typu je na obr. 5.1. Jedná se o reproduktor hlubokotónový, středotónový, nebo reproduktor, určený pro přenos celého akustického spektra signálů.

Membrána, která má obvykle tvar přibližně kuželové anebo nerozvinutelné plochy podobného tvaru, bývá zhotovena z papírové hmoty, která má při malé specifické hmotnosti dostatečnou tuhost a velké vnitřní tlumení, omezující vznik nežádoucích parazitních kmitů. Membrána musí být řešena tak, aby v co nejširší kmitočtové oblasti kmitala pístově. V současné době existují také membrány z tuhých pěnových anebo jinak lehčených materiálů (polymerů i kovů), voštinové membrány a jiné, které se však používají zatím jen v omezeném měřítku. Přínos, který tato nová provedení membrán představují, zatím neodpovídá jejich značné ceně.

Membrána je na svém obvodu opatřena poddajným okrajem, který dovoluje její osovou výchylku (která musí být u hlubokotónových reproduktorů při větších výkonech značná) a současně udržuje membránu v centrální poloze. U hlubokotónových reproduktorů a i některých středotónových bývá poddajný okraj zhotoven z pryžové fólie, vrstvy pěnového materiálu, impregnovaného plátna apod. Důležité je, aby byl pokud možno neprodyšný. U ostatních reproduktorů tvoří okraj zeslabená část membrány. Aby se odstranily nežádoucí parazitní kmity vlnek, bývají u některých typů reproduktorů tlumeny vhodným nátěrem anebo vrstvou materiálu, který absorbuje vibrace.

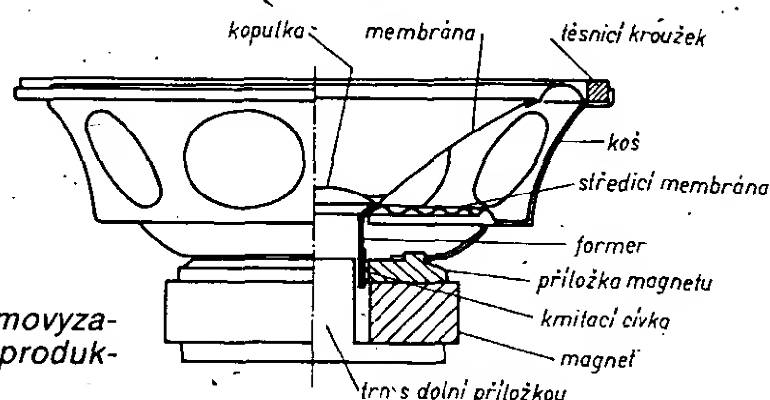
Na střední zúžené části membrány je připojen válcový former, nesoucí kmitací cívku, umístěnou v mezeře magnetického obvodu. Tento former bývá obvykle zhotoven z izolantu (nejčastěji impregnovaného papíru). U reproduktorů větších výkonů se používá také hliníkový former, který musí být ovšem přerušen mezerou, aby nepůsobil jako závit nakrátko. Tento former odvádí teplo vznikající v kmitací cívce. Aby je mohl lépe vyzářit, bývá někdy opatřen chladicími žebry. Konstrukcí kmitací cívky je omezen maximální přípustný elektrický budicí výkon.

Kmitací cívka musí mít takovou délku, aby se délka vodiče spřažená magnetickým polem s výchylkou membrány měnila co nejméně. Proto bývá cívka hlubokotónových reproduktorů značně delší než příložka magnetického obvodu, což má za následek zmenšení dosažitelné citlivosti. (Část cívky totiž zůstává neaktivní a odpor této neaktivní části neužitečně zvětšuje celkový odpor cívky).

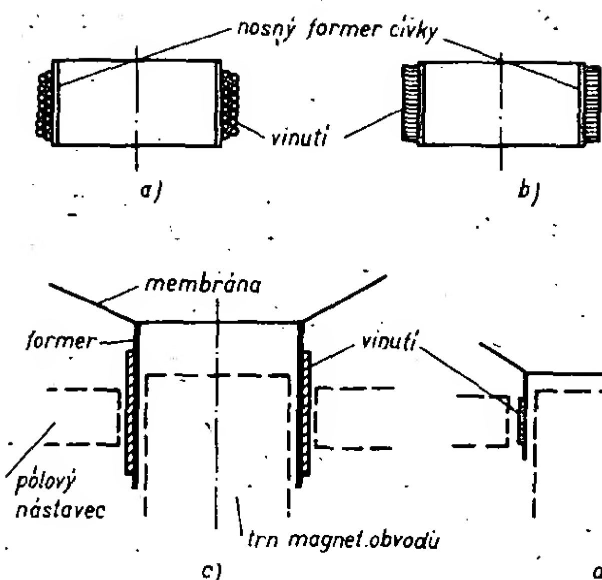
V místě spojení membrány s formerem je umístěn poddajný středicí prvek, který umožňuje axiální pohyb membrány a znemožňuje její vystředění. Tímto středicím prvkem bývá u moderních reproduktorů obvykle středicí membrána.

Membrána je s magnetickým obvodem, u něhož se v současné době používají převážně feritové magnety, spojena plechovým nebo litým košem, opatřeným dostatečně velkými otvory. Tento koš je obvyklý u reproduktorů hlubokotónových, středotónových a reproduktorů určených pro přenos celého akustického pásma.

Kmitací cívka je umístěna ve vzduchové mezeře magnetického obvodu (ve tvaru mezikruží), v níž je vytvořeno radiální magnetické pole o sycení B, protínající kolmo vodiče kmitací cívky. Pro činnost



Obr. 5.1. Schematický nákres přímovyzařujícího elektrodynamického reproduktoru



Obr. 5.2. Provedení kmitacích cívek elektrodynamických reproduktorů a jejich umístění ve vzduchové mezeře magnetického obvodu; a) cívka vinutá vodičem kruhového průřezu, b) cívka vinutá plochým vodičem, c) cívka hlubokotónového reproduktoru, d) cívka běžného reproduktoru a reproduktorů středo a vysokotónových

reproduktoru je rozhodující velikost součinu délky vodiče a sycení B (údaj Bl).

Kmitací cívka je obvykle vinuta měděným lakovaným drátem a to ve dvou vrstvách (obr. 5. 2a). U speciálních reproduktorů, u nichž je požadována velká citlivost, bývá použito v některých případech vinutí z hliníkového drátu. Aby se lépe využilo prostoru ve vzduchové mezeře magnetického pole, lze cívku navinout vodičem obdélníkovitého průřezu podle obr. 5. 2b. U vysokotónových reproduktorů bývá často kmitací cívka s ohledem na její nezbytnou malou hmotnost pouze jednovrstvová.

Je-li kmitací cívka o odporu R_v protékána proudem i, působí na ni a membránu síla

$F = Bli$ — [N; T, m, A] (5.1),

kde l je délka vodiče, který se nachází v magnetickém poli. Veličina Bl je jednou ze základních veličin, které charakterizují vlastnosti reproduktoru.

Pro vlastnosti reproduktoru je dále rozhodující aktivní plocha S_{akt} membrány, kterou lze přibližně stanovit z vnějšího a vnitřního průměru poddajného okraje membrány podle vztahu

$$D_{akt} = (D_1 + D_2)/2 \quad (5.2)$$

$$S_{akt} = \frac{\pi}{4} D^2_{akt} \quad (5.3)$$

a obr. 5.3.

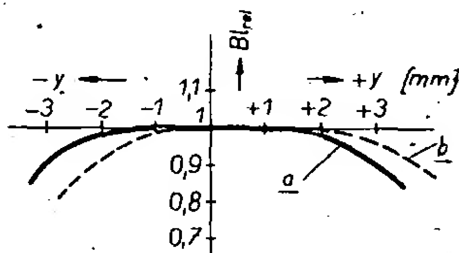
Významná je také velikost poddajnosti c_1 uložení kmitacího systému reproduktoru, která však bývá dosti proměnná, stejně jako jeho rezonanční kmitočet. Poddajnost uložení se obvykle udává jako ekvivalentní objem V_{ekv} o stejné akustické poddajnosti, pro nějž platí

$$V_{ekv} = p_0 \varkappa c_{1ak} = c^2 \varrho c_{1ak} = 1{,}4.10^5 c_{1ak} \quad [m^3; m^3/Pa] \quad (5.4).$$

Pro posouzení vlastností reproduktoru jsou dále důležité hmotnost jeho kmitacího systému m_1, mechanické ztráty, vznikající při jeho kmitání, charakterizované ztrátovým odporem r_1 a elektrická impedance reproduktoru při jeho rezonančním kmitočtu.

Velikost vyzářeného akustického výkonu reproduktoru je omezena možnou amplitudou membrány a přípustnou elektrickou zatížitelností kmitací cívky (omezenou jejím oteplením).

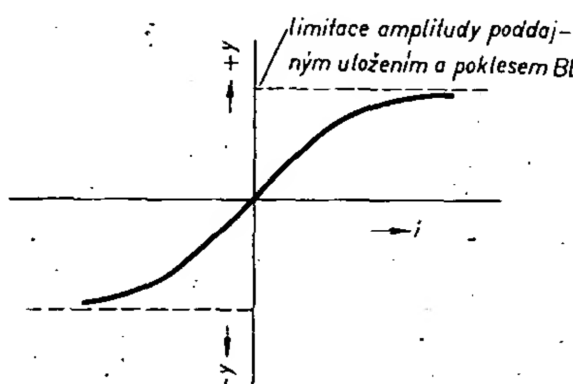
Při činnosti reproduktoru je nutné, aby konstanta Bl byla minimálně závislá na amplitudě membrány a aby se zmenšovala v závislosti na této amplitudě symetricky vůči klidové poloze (obr. 5.4). Nesy-



Obr. 5.4. Závislost konstanty Bl na výchylce membrány; a) správný průběh závislosti $Bl = f(y)$, b) nevhodný průběh Bl na amplitudě, způsobený nesprávnou montáží membrány

metrický tvar průběhu $Bl = f(y)$ znamená, že klidová poloha kmitacího systému je nesprávná, což může být způsobeno při montáži anebo dodatečnou deformací středicí membrány či poddajných vlnek.

Rovněž tak má být symetrická závislost mezi výchylkou membrány a silou na ni působící (obr. 5.5) vzhledem ke klidové



Obr. 5.5. Závislost amplitudy na proudu protékajícím vinutím kmitací cívky (u kvalitního reproduktoru)

poloze membrány. Z hlediska správné činnosti reproduktoru má s ohledem na vznikající zkreslení větší význam závislost $Bl = f(y)$ než závislost podle obr. 5.5 ($y = f(i)$).

Jak již bylo uvedeno, je poddajnost uložení kmitacího systému hodnota značně nestálá, stejně jako rezonanční kmitočet f_r. Poddajnost c_1 bývá u nového reproduktoru značně menší než u reproduktoru, který je již delší dobu v provozu. Je dále závislá na amplitudě membrány. Na tyto skutečnosti nutno brát ohled při aplikaci reproduktorů. Proto není účelné vázat se příliš při návrhu ozvučnice na značně neurčitou velikost poddajnosti kmitacího systému.

Jednotlivými základními prvky reproduktoru, o nichž zde byla řeč, jsou charakterizovány jeho hlavní vlastnosti, to je jeho citlivost, kmitočtový průběh, do jisté míry i velikost nelineárního zkreslení, maximální vyzářitelný akustický výkon a jeho použitelnost ve spojení s ozvučnicí.

Jak vyplynulo z uvedeného, pro posouzení vlastností reproduktoru a jeho použitelnosti jsou důležité tyto veličiny:

1. Aktivní plocha S_{akt} membrány [m²],
2. Hmotnost kmitacího systému (mechanická anebo akustická)
   $$m_{1ak} = \frac{m_{1mech}}{S^2_{akt}} \quad [kg/m^4],$$
3. Veličina Bl anebo Bl/S_{akt} [T.m; T/m],
4. Odpor R_v vinutí kmitací cívky [Ω],
   4a. Jmenovitá impedance Z_n [Ω],
5. Jmenovitý příkon N [VA],
6. Maximální použitelná amplituda membrány omezená zmenšením Bl vlivem výchylky, y_{max}, případně max. objemový posuv $\Delta V = y_{max} S_{akt}$ membrány, poddajnost kmitacího systému $c_{1ak} = c_{1max} S_{ak}^2$, nebo
7. Ekvivalentní objem V_{ekv} [m³], případně rezonanční kmitočet f_{rez} [Hz], kmitočtový průběh s udáním dolního a horního mezního kmitočtu,
8. Charakteristická citlivost η [Pa/VA/m] nebo [dB/VA/m],
9. Nelineární zkreslení,
10. Směrové charakteristiky,
11. Činitele jakosti Q_o, Q_{el}, Q_c při rezonančním kmitočtu

Poznámka. U reproduktoru je nutno uvažovat dvě různé citlivosti, a to citlivost definovanou podle ČSN, při níž se vychází z průměrné hladiny akustického tlaku uvažované obvykle v kmitočtové oblasti 250 až 4000 Hz, a citlivosti, která se uplatňuje v oblasti pístového pohybu membrány, kterou lze vypočítat ze základních konstant reproduktoru. Rozdíl mezi oběma citlivostmi, který závisí na způsobu kmitání membrány v oblasti vyšších kmitočtů, nepřesahuje obvykle 1 až 3 dB.

Znalost všech uvedených veličin je nezbytná u hlubokotónových reproduktorů a reproduktorů určených pro přenos celého akustického pásma, má-li být pro reproduktor navržena ozvučnice.

Z vyjmenovaných veličin se běžně uvádějí pouze údaje jmenovité impedance, jmenovitého příkonu, rezonančního kmitočtu a občas citlivost a přenášené kmitočtové pásmo. Pouze někteří opravdu seriózní výrobci uvádějí veškeré potřebné údaje, doplněné případně i údaji činitelů jakosti reproduktoru.

Údaje všech vyjmenovaných veličin není ovšem třeba uvádět, protože mnohé z nich jsou na sobě závislé a lze je snadno z ostatních odvodit.

V dalším jsou uvedeny vztahy, z nichž jsou patrné definice jednotlivých vlastností a údajů a jejich vzájemný přepočet.

Rezonanční kmitočet reproduktoru:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_1 c_1}} \quad [Hz] \quad (5.5).$$

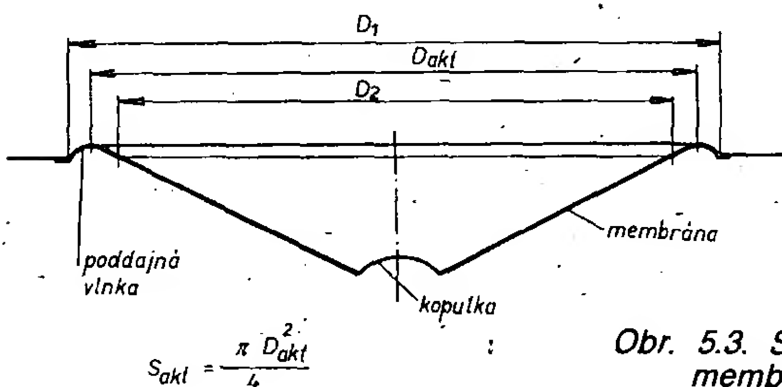
Elektrický činitel jakosti reproduktoru:

$$Q_{el} = \frac{2\pi f_{rez} m_{1ak} R_v}{(Bl/S)^2} \quad [-; Hz, kg/m^4, \Omega, Tm, m^2] \quad (5.6).$$

Celkový činitel jakosti reproduktoru:

$$Q_c = Q_{el} \frac{Z_{rez} - R_v}{Z_{rez}} = (Q_{el} Q_0)/(Q_{el} + Q_0) \quad (5.7),$$

kde Z_{rez} je impedance reproduktoru při



Obr. 5.3. Stanovení aktivního průměru membrány a její aktivní plochy

rezonančním kmitočtu. Činitel jakosti reproduktoru naprázdno:

$$Q_0 = \frac{2\pi f_{rez} m_{1ak}}{(Bl/S)^2}(Z_{rez} - R_v)$$

$$[-;\ \mathrm{Hz},\ \mathrm{kg/m^4},\ \Omega,\ \mathrm{T/m}] \qquad (5.8)$$

Citlivost reproduktoru v nadrezonanční oblasti:

$$\eta = \frac{\varrho}{2\pi\sqrt{R_v}} \frac{Bl}{S} \frac{1}{m_{1ak}}$$

$$[\mathrm{Pa}/\sqrt{\mathrm{VA}}/\mathrm{m};\ \mathrm{Tm},\ \mathrm{m^2},\ \mathrm{kg/m^4}] \qquad (5.9)$$

Citlivost reproduktoru:

$$\eta = 52{,}1 + 10\log\frac{f^3_{rez} V_{ekv}}{Q_{el}}$$

$$[\mathrm{dB}/\sqrt{\mathrm{VA}}/\mathrm{m};\ \mathrm{Hz},\ \mathrm{m^3},\ -] \qquad (5.10)$$

$$\eta\ [\mathrm{dB}] = 87{,}6 + 10\log\frac{f_{rez}}{Q_{el} m_{1ak}} \qquad (5.11).$$

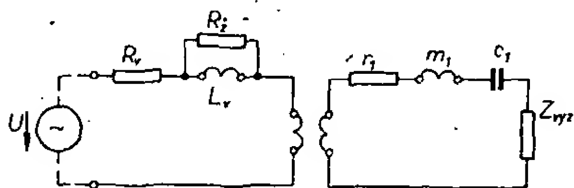
Kmitočtový průběh reproduktoru umístěného v nekonečné ozvučnici, jakož i citlivost a kmitočtový průběh amplitudy membrány lze určit z ekvivalentního schématu [1], [2], [3] (podle obr. 5.6), nebo jeho zjednodušené varianty (podle obr. 5.7). Pro úplnost je na obr. 5.8 elektrické náhradní schéma reproduktoru.

Kmitočtový průběh akustického tlaku v ose reproduktoru umístěného v rozlehlé deskové ozvučnici ve vzdálenosti ξ od jeho ústí je dán vztahem

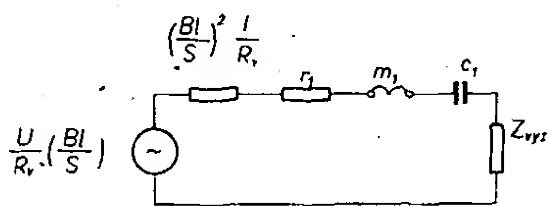
$$p = \eta\frac{1}{\xi} \frac{q^2}{\left|(q^2-1)+\mathrm{j}\frac{q}{Q_c}\right|} \qquad (5.12),$$

kde $q = f/f_{rez}$ (5.13).

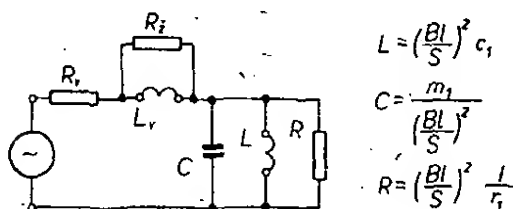
Vztah (5.12) platí za předpokladu, že membrána kmitá pístově, což je splněno v oblasti nízkých, příp. středních kmitočtů (podle druhu reproduktoru).



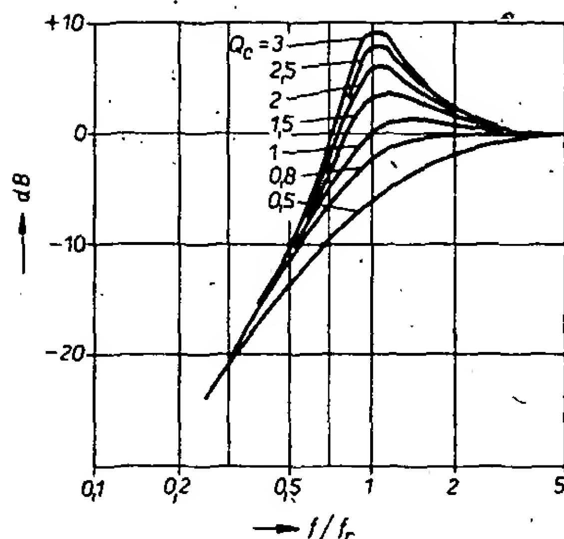
Obr. 5.6. Úplné ekvivalentní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.7. Zjednodušené ekvivalentní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.8. Elektrické náhradní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.9. Kmitočtové průběhy přímovyzařujícího elektrodynamického reproduktoru, umístěného v nekonečné ozvučnici, pro různé celkové činitele kvality Q_c

Na obr. 5.9 je soustava kmitočtových průběhů reproduktoru pro různé činitele jakosti Q_c. Nejpříznivější průběh se získá při Q_c v rozmezí 0,8 až 1. V podrezonanční oblasti stoupá kmitočtový průběh se směrnicí 12 dB/okt, v nadrezonanční oblasti, kdy je pohyb kmitacího systému řízen reaktancí jeho hmotnosti (jeho urychlení je konstantní), je kmitočtově nezávislý.

Výchylka membrány reproduktoru je při daném akustickém tlaku p ve vzdálenosti ξ od ústí reproduktoru dána vztahem

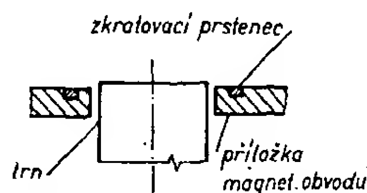
$$y = \frac{\xi}{\sqrt{2}\pi\varrho}\frac{1}{S}\overline{p}\frac{1}{f^2_{rez}}\frac{1}{\left|(q^2-1)-\mathrm{j}\frac{q}{Q_c}\right|} \qquad (5.14)$$

kdy $\overline{p} = \eta\sqrt{N}$ (5.14a),

což odpovídá velikosti akustického tlaku pro $q >> 1$ (v nadrezonanční oblasti).

Relativní průběh výchylky y je na obr. 5.9, a to pro různé jakosti Q_c. Také z tohoto grafu je zřejmá výhodnost volby Q_c v rozmezí 0,8 až 1.

Případný pokles kmitočtového průběhu v oblasti vyšších kmitočtů může být způsoben zvětšením impedance kmitací cívky vlivem její indukčnosti. Tento nežádoucí jev lze omezit pomocným měděným zkratovacím prstencem zasazeným do příložky magnetického obvodu (obr. 5.10). Vstupní impedance takto upraveného reproduktoru se pak v oblasti vyšších kmitočtů nezvětšuje, což je příznivé při připojení reproduktoru na výstupní svorky výhybek i s ohledem na případné fázové zkreslení v oblasti vyšších kmitočtů.



Obr. 5.10. Magnetický obvod reproduktoru opatřený zkratovacím prstencem pro zmenšení indukčnosti kmitací cívky

Pokud má být běžný reproduktor připojen na výstupní svorky výhybky, která pro správnou činnost vyžaduje reálnou zatěžovací impedanci, lze upravit vstupní impedanci reproduktoru v oblasti vyšších kmitočtů paralelním připojením obvodu ze sériové kombinace rezistoru R' a kondenzátoru C' (obr. 5.11).

Odpor i kapacita kompenzačního prvku, které lze určit z kmitočtového průběhu vstupní impedance reproduktoru, jsou uvedeny v tabulce v další kapitole. V kompenzačním prvku lze použít i elektrolytický kondenzátor, protože pro správnou funkci obvodu není příliš kritická přesná velikost kapacity.

Při aplikaci přímovyzařujícího reproduktoru nutno mít na zřeteli skutečnost, že jeho směrová charakteristika závisí na poměru $2\pi R/\lambda$. Od určitého kmitočtu je proto reproduktor pro příliš intenzívní směrování (čili velký činitel směrovosti) již těžko použitelný, pokud membrána kmitá pístově. To platí zejména pro hlubokotónové reproduktory. U běžných širokopásmových reproduktorů je směrování mírně omezeno vlivem parciálních kmitů membrány, zejména tím, že v oblasti vysokých kmitočtů se ve zvýšené míře uplatňuje jen její střední část.

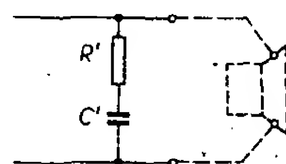
Nelineární zkreslení u přímovyzařujícího reproduktoru vzniká při velkých amplitudách membrány obvykle závislostí Bl na amplitudě a to zejména při nesprávné klidové poloze kmitací cívky (je-li cívka jednosměrně vysunuta z optimální polohy). Za takových okolností vzniká i značné intermodulační zkreslení.

Při kmitočtech v blízkosti rezonance a nižších než rezonanční kmitočet se k již zmíněnému vlivu může připojit i nelinearita poddajného uložení kmitacího systému. Tato oblast kmitočtového pásma však již není příliš zajímavá pro značné zmenšení citlivosti reproduktoru.

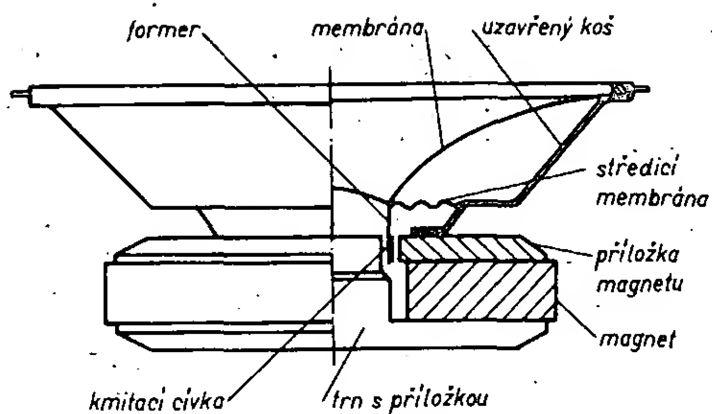
Při současném vyzařování signálu o nízkém kmitočtu f_1 a vysokém kmitočtu f_2 dochází ke zkreslení kmitočtovou modulací vyzařovaného signálu o kmitočtu f_2 vlivem Dopplerova efektu (při přibližování membrány k pozorovateli se kmitočet f_2 zvyšuje a při vzdalování se snižuje, což se děje periodicky, s kmitočtem f_1). Velikost tohoto zkreslení je dána výrazem
$k = 0{,}29 f_2\sqrt{P_a}/f_1^2 D^2$ [%; Hz; Hz; W, m], kde P_a je akustický výkon signálu o kmitočtu f_1 a D aktivní průměr reproduktoru. Tento druh zkreslení lze omezit použitím vysokotónových reproduktorů, uplatňujících se současně s hlubokotónovým.

U reproduktoru vzniká při větším příkonu a při určitých kmitočtech signál o nižším kmitočtu (obvykle polovičním), než jakým je buzen. Přestože je úroveň tohoto signálu velmi nízká (často jen několik procent signálu původního), bývá velmi dobře sluchem postřehnutelný, zejména při vyzařování sinusových tónů. Jedná se o takzvané subharmonické signály, které vzniknou, je-li vlastní kmitočet parciálních kmitů membrány právě polovinou kmitočtu budicího signálu. Jejich vznik je omezen u membrán nerozvinutelného tvaru, pokud jsou zhotoveny z materiálu o dostatečně velkém vnitřním tlumení.

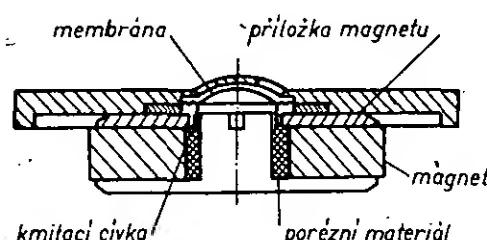
Vysokotónové elektrodynamické cívkové přímovyzařující reproduktory, které jsou v současné technické praxi běžné, jsou na obr. 5.12 a 5.13. První typ reproduktoru (obr. 5.12) svým provedením připomíná klasický elektrodynamický reproduktor. Jeho membrána má však podstatně menší průměr, což je nutné s ohledem na směrovou charakteristiku, krátkou kmitací cívku, která nepřesahuje pólový nástavec, někdy vnitřní středicí prvek, obvykle přímo připojený na trn magnetu a uzavřený koš. Membrána bývá u tohoto typu reproduktoru z papírové hmoty a její

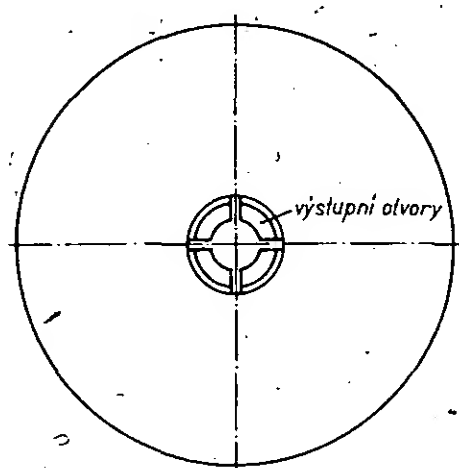


Obr. 5.11. Obvod pro vyrovnání vstupní impedance reproduktoru v nadrezonanční oblasti



Obr. 5. 12. Schématický nákres jednoduchého elektrodynamického výškového reproduktoru





Obr. 5.13. Schematický nákres vysokotónového reproduktoru s membránou ve tvaru kulového vrchlíku

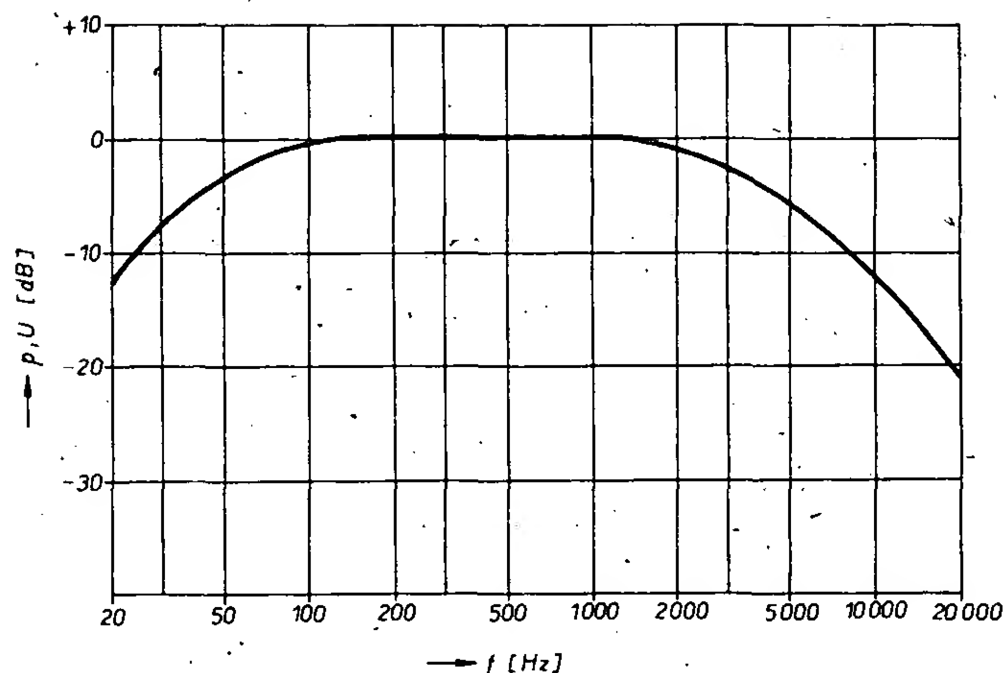
okraj má dosti značnou tuhost. Plocha membrány bývá poměrně malá (její průměr bývá vždy menší než 100 mm). Rezonanční kmitočet kmitacího systému bývá v rozmezí 1 až 1,5 kHz.

Vysokotónový reproduktor podle obr. 5.13 má membránu ve tvaru kulového vrchlíku, zhotovenou obvykle z polymerové fólie. Jediným středicím prvkem kmitacího systému je jeho poddajný okraj. Kmitací cívka navinutá na dostatečně tuhém a s membránou pevně spojeném formeru mívá obvykle jednu vrstvu závitů, aby se zmenšila její hmotnost na minimum (což je nutné s ohledem na citlivost a kmitočtový průběh).

Průměr membrány takto řešeného reproduktoru nebývá větší než 20 mm, takže je zaručeno jeho všesměrové vyzařování až do oblasti vysokých kmitočtů.

Budicí elektrický signál vysokotónových reproduktorů musí být vhodnými elektrickými obvody upraven tak, aby se na jejich svorkách neobjevilo napětí o nižším kmitočtu, než je dolní mezní kmitočet reproduktoru, obvykle předepsaný výrobcem.

Vysokotónový reproduktor doporučený pro aplikaci v reproduktorové soustavě o určitém jmenovitém příkonu (např. 20 W) nelze totiž v žádném případě zatížit tímto výkonem v oblasti pod jeho dolním mezním kmitočtem. Také jej však nelze zatížit plným výkonem ani v oblasti vysokých kmitočtů. Předpokládá se totiž, že přirozený akustický signál má spektrální složení odpovídající průběhu podle obr. 5.14, u něhož je relativní hladina signálů o vysokých kmitočtech proti úrovni u středních kmitočtů snížena.



Obr. 5.14. Kmitočtový průběh zkušebního signálu nahrazujícího přirozený signál (podle IEC)

5.1.1 Údaje nejdůležitějších typů hlubokotónových přímovyzařujících reproduktorů, vyráběných v ČSSR

V článku jsou uvedeny základní údaje přímovyzařujících reproduktorů vyráběných v ČSSR, použitelných pro osazení reproduktorových soustav, určených pro kvalitní reprodukci zvuku.

V tab. 2 jsou shrnuty údaje hlubokotónových reproduktorů, jejichž znalost je nezbytná pro návrh ozvučnic. Jedná se o údaje informativní, které se mohou poněkud lišit u různých výrobních sérií. Tak například hlubokotónové reproduktory o vnějším průměru 200 mm (typy ARN 6604/8), vyráběné v roce 1983 mají větší činitele Q_{el} i Q_c, takže je nelze bez dalších úprav použít ve spojení s bass-reflexovými ozvučnicemi. V každém případě je účelné ověřit si před návrhem ozvučnice (zejména bass-reflexové) (změřit nebo určit) vlastnosti použitého reproduktoru včetně použitelné maximální amplitudy.

V tab. 3 jsou základní údaje o středotónovém reproduktoru a vysokotónových reproduktorech, které lze použít při návrhu vícepásmových reproduktorových soustav.

Pokud mají být pro osazení reproduktorových soustav použity reproduktory

Tab. 2. Údaje hlubokotónových reproduktorů

Typ reproduktoru		ARN 5604	ARN 5608	ARN 6604	ARN 6608	ARN 8604	ARN 8608	ARN 934	ARN 932	ARN 734
Aktivní průměr membrány D	mm	134	134	172	172	250	250	334	327	225
Plocha membrány S	dm²	1,4	1,4	2,32	2,32	4,7	4,7	8,76	8,4	4
Jmenovitá impedance Z_j	Ω	4	8	4	8	4	8	4	15	4
Odpor vinutí kmit. cívky R_v	Ω	3,9	7,8	3,9	7,8	3,85	7,7	3,5	12,5	4
Jmenovitý příkon N	W	15	15	20	20	30	30	50	25	
Akust. hmota m_{ak} kmit. systému	kg/m⁴	64	64	40	40	30,4	31	10,4	8,4	25
Ekvivalentní objem V	dm³	45	45	83	85	280	280	160	470	185
Rezonanční kmitočet f_r	Hz	35	38	33	34	26	26	46	30	28
Konstanta Bl/S	T/m	350	480	220	295	202	285	148	207	
Činit. jakosti (elektrický) $Q_{el,r}$		0,46	0,50	0,68	0,76	0,40	0,4	0,48	0,46	0,65
Činitel jakosti (celkový) $Q_{c,r}$	-	0,42	0,45	0,6	0,66	0,38	0,38	0,40	0,42	0,62
Činit. jakosti mechanický $Q_{o,r}$		4,5	4,5	5	5	6,9	7	2,26	5	15
Citlivost η_{dB}	dB/√VA/m	88,5	89	89,5	90	90,7	91	98	96,5	90
Maximální výchylka η	mm	3,5	3,5	4	4	4	4	2,5	3,5	3
Horní mezní kmitočet	kHz	4 až 5	4 až 5	3 až 4	3 až 4	1	1	6	1	3
Korekční obvod R, C	Ω	5,5	9	5,5	9	–	–	–	–	–
	μF	12 až 25	10 až 15	12 až 25	10 až 15					

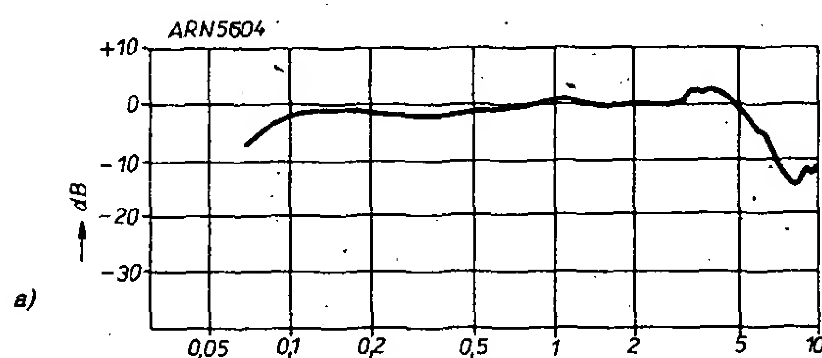
Tab. 3. Údaje středotónového a vysokotónových reproduktorů

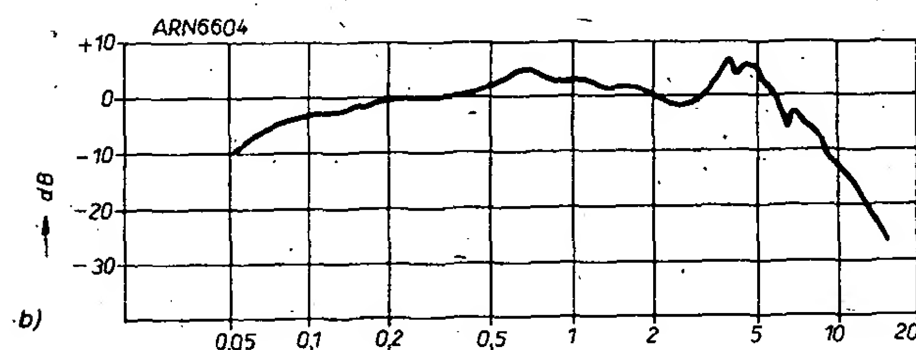
Typ reproduktoru		Středotónový ARZ 4604	ARZ 4608	Vysokotónové reproduktory ARV 3604	ARV 3608	ARV 161	ARV 168
Aktivní průměr membrány	mm	95	95	26	26	–	–
Jmenovitá impedance	Ω	4	8	4	8	4	8
Jmenovitý příkon	VA	20	20	10	10	5	5
Dolní mezní kmitočet	kHz	0,5	0,5	2	2	1,5	1,5
Horní mezní kmitočet	kHz	4	4	20	20	20	20
Rezonanční kmitočet	kHz	0,23 až 0,25		1,2	1,2	1	1
Charakteristická citlivost	dB/VA/m	89	89	89	89	92	92
Korekční obvod *R'*, *C'*	Ω	5	10	–	–	–	–
	μF	10	5				

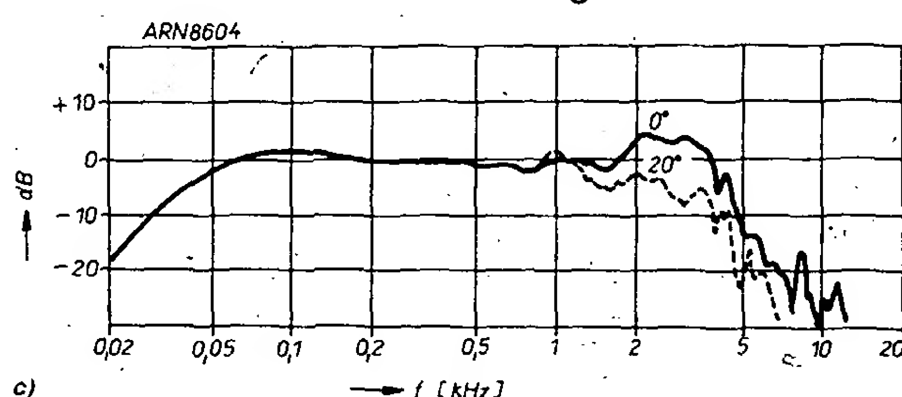
jiných typů, je nezbytné jejich základní vlastnosti změřit.

Kmitočtové charakteristiky hlubokotónových reproduktorů (měřené u reproduktorů umístěných na standardní ozvučnici) jsou na obr. 5.15. Pro posouzení vlastností reproduktorů má význam část průběhu v oblasti nad 200 až 400 Hz, protože průběh v oblasti nízkých kmitočtů je závislý na typu použité ozvučnice (o tom bude jednáno v příslušné kapitole).

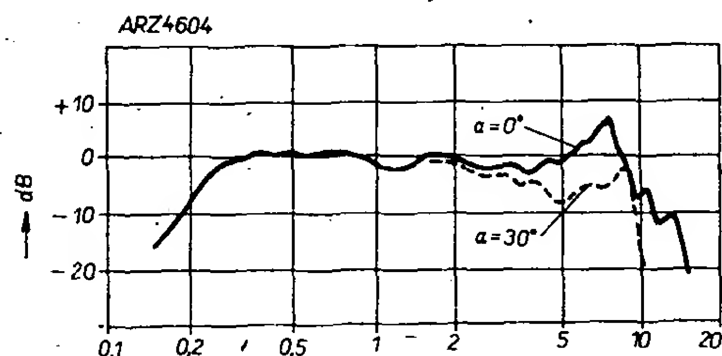
Pro úplnost jsou na obr. 5.16 kmitočtové průběhy reproduktorů, upevněných ve standardní ozvučnici.

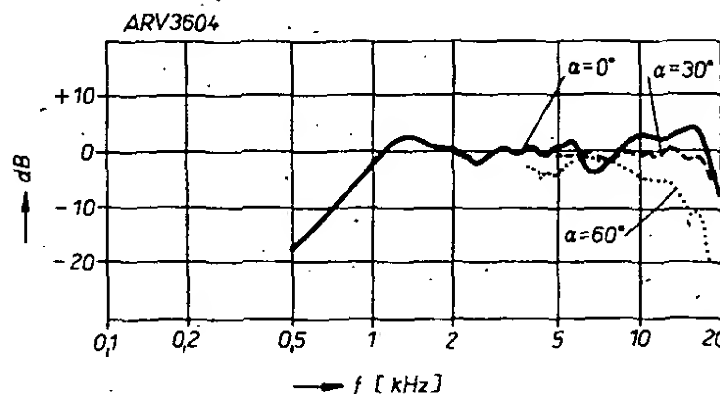






Obr. 5.15. Kmitočtové průběhy hlubokotónových reproduktorů TESLA; a) ARN 5604, b) ARN 6604, c) ARN 8604





Obr. 5.16. Kmitočtové průběhy středotónového reproduktoru ARZ 4604 a vysokotónového reproduktoru ARV 3604

5.1.2 Údaje středotónového a vysokotónových reproduktorů

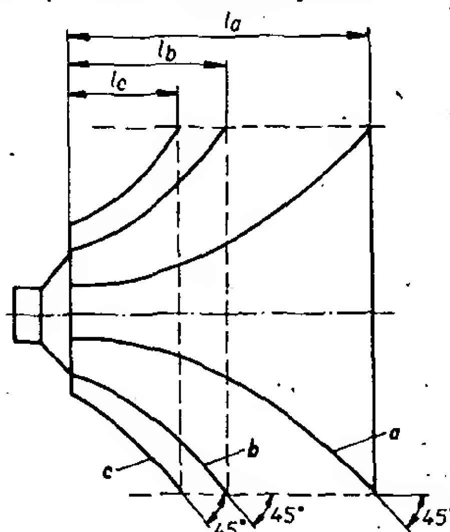
V tab. 3 jsou základní údaje o středotónovém reproduktoru a vysokotónových reproduktorech, které lze použít v několikapásmových reproduktorových soustavách. Jsou uvedeny jen typy, jejichž výroba se výhledově předpokládá.

Údaje potřebného korekčního obvodu *R'*; *C'* jsou pouze u středotónového reproduktoru, u něhož mají význam.

Jde zde vesměs o reproduktory s uzavřeným košem, které lze bez dalšího vestavět do reproduktorových soustav (bez oddělení speciální uzavřenou skříňkou).

6. Nepřímovyzařující reproduktory

Membrána nepřímovyzařujících reproduktorů je spojena s vnějším prostředím zvukovodem. Jsou celkem tři možná základní uspořádání. U prvního (obr. 6.1c) je aktivní plocha membrány menší než plocha hrdla zvukovodu, u uspořádání podle obr. 6.1b je plocha hrdla zvukovodu stejná jako plocha membrány, u třetího je vstupní plocha zvukovodu menší než plocha membrány (obr. 6.1a).



Obr. 6.1. Možné navázání zvukovodů na membránu elektroakustického měniče

První uspořádání (c), u něhož je rychlost membrány větší než rychlost vzduchu vstupujícího do zvukovodu, se v současné době používá u hlubokotónových reproduktorů pro kina, u nichž se využívá toho, že délka zvukovodu je ze všech tří uvedených případů nejmenší, stejně jako i akustická zátěž membrány. Lze zde aplikovat běžný typ hlubokotónového reproduktoru.

U uspořádání, u něhož je vstupní průřez zvukovodu stejný jako plocha membrány, je nad kritickým kmitočtem zvukovodu membrána o ploše *S* zatížena akustickou impedancí:

$$z_v = \frac{c\varrho}{S}(A + jB).$$

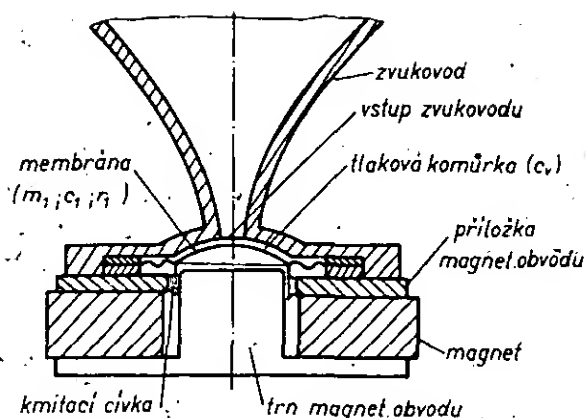
Akustický výkon, který membrána, produkující objemovou rychlost w ($= vS$) vyzařuje v oblasti nad kritickým kmitočtem zvukovodu, pak je

$$P_a \doteq \frac{c\varrho}{S} w^2 = r_{v,ak} w^2.$$

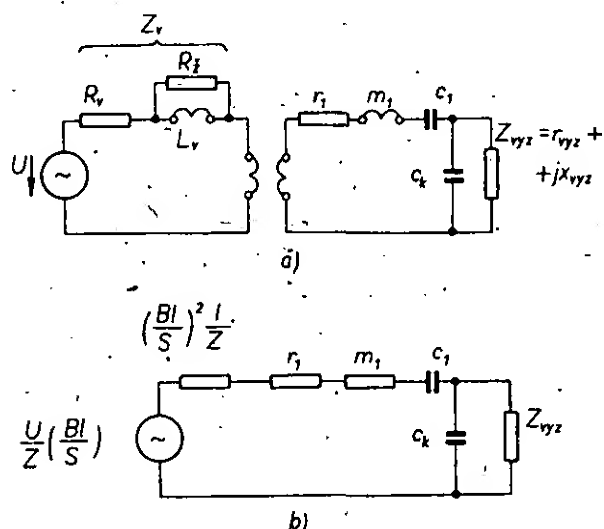
Pokud převažuje vyzařovací odpor r_v nad akustickou impedancí samotné membrány, je při konstantní síle působící na membránu i vyzářený akustický výkon konstantní.

Toto uspořádání elektroakustického měniče se používá například u nepřímovyzařujících páskových vysokotónových reproduktorů a jejich modifikací. Horní mezní kmitočet takového zářiče je charakterizován rovností vstupní akustické impedance zvukovodu a akustické impedance kmitající membrány.

Membrána elektroakustického měniče o ploše *S*, navazující podle obr. 6.1a na vstup zvukovodu o ploše S_1, je zatížena akustickou impedancí nezávislou na ploše této membrány. Zatěžovací impedance membrány je tedy větší než v prvních dvou případech. Omezení, pokud jde o přenos vyšších kmitočtů, však představuje akus-



Obr. 6.2. Schematické uspořádání tlakového elektrodynamického reproduktoru



Obr. 6.3. Úplné ekvivalentní schéma tlakového reproduktoru (a) a schéma zjednodušené (b)

tická impedance dutiny mezi membránou a vstupech zvukovodu. Reproduktor, u něhož je vstupní průřez zvukovodu menší než plocha membrány, se nazývá reproduktor tlakový.

Schematické uspořádání elektrodynamického tlakového reproduktoru je na obr. 6.2; jeho analogický obvod, z něhož lze stanovit výsledný teoretický kmitočtový průběh zářiče, je na obr. 6.3. Tento obvod platí pro oblast kmitočtů vyšších, než je kritický kmitočet zvukovodu.

V oblasti nízkých kmitočtů, kdy se uplatňuje vliv poddajnosti kmitacího systému reproduktoru, se zvětšuje objemová rychlost membrány přímo úměrně s kmitočtem (směrnice této části kmitočtového průběhu je 6 dB/okt, viz obr. 6.4).

V oblasti středních kmitočtů, kdy v analogickém obvodu převládá vliv impedance zvukovodu, která je reálná a kmitočtově nezávislá, je objemová rychlost nezávislá na kmitočtu stejně jako vyzářený výkon a akustický tlak před ústím reproduktoru.

V oblasti vysokých kmitočtů, kdy se uplatňuje vliv impedance dutiny komůrky před membránou reproduktoru a hmotnost kmitacího systému s membránou (popř. uplatní-li se rezonance této komůrky s hmotností kmitacího systému, při kmitočtu f_2), nastává zlom kmitočtové charakteristiky, která v nadrezonanční oblasti klesá se směrnicí 12 dB/okt.

Kmitočty zlomů kmitočtové charakteristiky jsou dány vztahy

$$f_1 = \frac{1}{2\pi c_1 r_2} \text{ (6.1)}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_1 c_k}} \qquad (6.2)$$

přičemž činitel jakosti

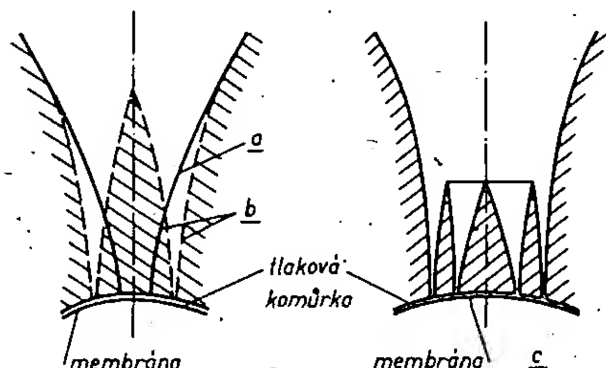
$$Q_s = \frac{2\pi f_2 m_1}{\frac{c_0 \varrho}{S_1}} \qquad (6.3)$$

se má rovnat 1; c_1 a c_k jsou poddajnosti membrány a dutiny komůrky

$$c_k = \frac{S\delta}{p_0 \varkappa} \qquad (6.4)$$

kde S je plocha membrány a δ výška komůrky).

To vše platí za předpokladu, že délka vlny přenášeného signálu je větší než průměr membrány. Není-li tato podmínka splněna, vznikají v tlakové komůrce radiální kmity a zpoždění akustických rozruchů konečnými rozměry membrány, které podstatně ovlivní výsledný kmitočtový průběh měniče. Tento nežádoucí vliv lze omezit volbou několika vyústění zvukovodu, anebo alespoň vyústěním ve tvaru mezikruží (obr. 6.5).



Obr. 6.5. Způsoby vyústění zvukovodu do komůrky; a) jednoduché vyústění, b) vyústění ve tvaru jednoho mezikruží, c) vyústění ve tvaru dvou mezikruží

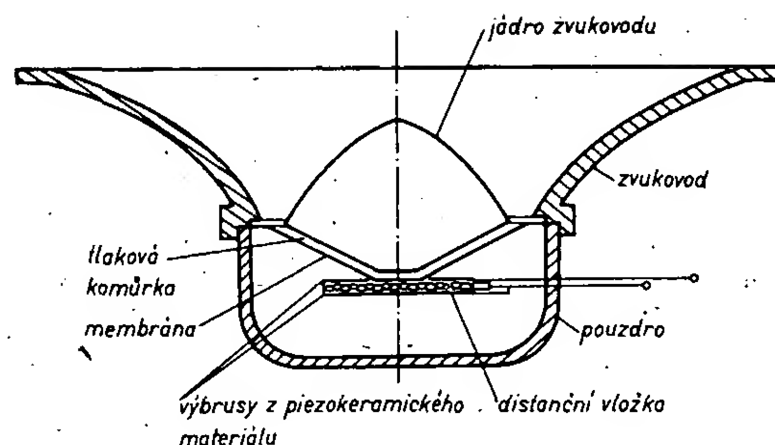
První nežádoucí mód radiálních kmitů se vyloučí, má-li vstup zvukovodu ve tvaru prstence poloměr $R_1 = 0{,}63 R_a$, kde R_a je poloměr komůrky. Takové vyústění je u vysokotónových reproduktorů středních výkonů postačující.

Účinnost tlakového reproduktoru, daná výrazem

$$\eta = 1/[1 + (c_0\varrho/S_1) R_v (Bl/S)^{-2}] \,.\, 100\ \% \qquad (6.5)$$

může být při vhodné konstrukci 10 až 20 %.

Kromě elektrodynamických nepřímovyzařujících vysokotónových reproduktorů se v posledních letech uplatňují piezoelektrické reproduktory s piezokeramickým měničem. Uspořádání takového reproduktoru, který v současné době vyrábí v několika provedeních firma MOTOROLA, je patrné z obr. 6.6. Elektromechanický měnič ve formě takzvaného Sawyerova dvojčete se skládá ze dvou tenkých piezoelektricky aktivních kruhových destiček, opatřených po obou svých stranách vodivými vrstvami, které jsou paralelně propojeny. Destičky o průměru asi 25 mm mají tloušťku asi 0,1 mm a jsou pevně spojeny s distanční podložkou, zhotovenou z profilované kovové fólie. Tato úprava má za následek, že rezonanční kmitočet měniče je v oblasti 5 až 8 kHz.



Obr. 6.6. Schematické uspořádání piezoelektrického tlakového reproduktoru firmy Motorola

Na střední část destičky je přitmelena kuželová membrána, svými okraji spojená s tělesem pouzdra reproduktoru, s nímž souvisí vhodně tvarovaný zvukovod, který navazuje na tlakovou komůrku vytvořenou před membránou.

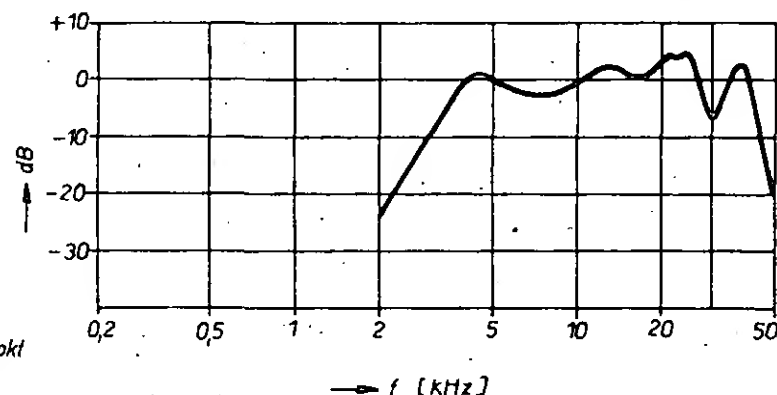
Piezoelektrický měnič je na svých okrajích volný a jeho střed kmitá proto, že se uplatňuje reaktance hmotnosti obvodu měniče. Přednost tohoto uspořádání spočívá v tom, že se u měniče neuplatňují parazitní rezonance, které by se nutně projevily, kdyby byl měnič po obvodu upnut.

Popsaný reproduktor je mimořádně citlivý a má velmi vyrovnaný kmitočtový průběh, podle typu buď od 3 do 35 kHz anebo od 1,5 do 30 kHz. Další předností reproduktoru je, že jej lze přímo bez výhybky připojit na výstup zesilovače a dále, že jeho příkon je ve srovnání s příkonem ostatních reproduktorů soustavy zanedbatelně malý. Pro informaci je na obr. 6.7 kmitočtový průběh piezoelektrického vysokotónového reproduktoru KSN 6016 A.

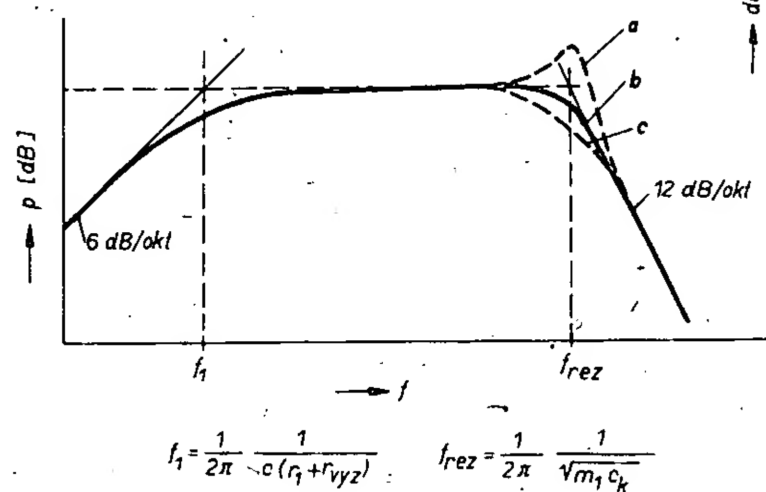
Další předností tohoto reproduktoru je jeho mimořádně nízká cena.

7. Reproduktorová ozvučnice

U přímovyzařujících reproduktorů vyzařuje jak přední, tak i zadní strana membrány a to tak, že fáze vzniklého akustického signálu před a za membránou je



Obr. 6.7. Kmitočtový průběh reproduktoru Motorola typ KSN 6016A



$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{c(r_1 + r_{vyz})}$ $\qquad f_{rez} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_1 c_k}}$

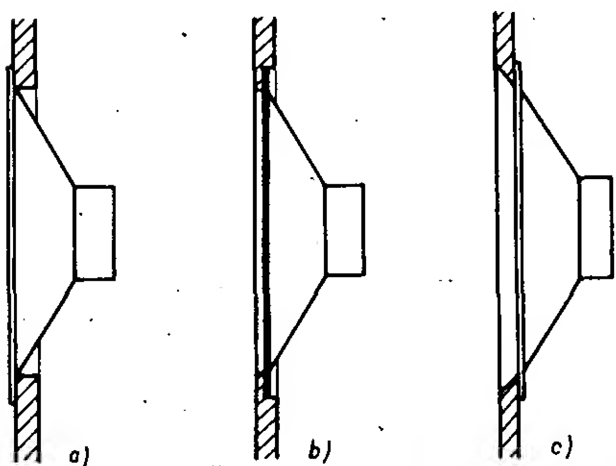
Obr. 6.4. Teoretický kmitočtový průběh elektrodynamického tlakového reproduktoru. (Průběh v oblasti rezonančního kmitočtu je dán velikostí poměru $\frac{\omega_0 m_1}{r_{vyz}}$)

opačná. Přímovyzařující reproduktor bez ozvučnice představuje v podstatě jeden ze základních zářičů, o němž již byla řeč, a to samotnou kmitající membránu ve volném prostoru, která v oblasti nízkých kmitočtů má velmi malou účinnost (akustický tlak ideálního reproduktoru s pohybem membrány řízeném její hmotností, jejíž urychlení je konstantní, se v oblasti nízkých kmitočtů s rostoucím kmitočtem zvětšuje se směrnicí 6 dB/okt).

Tento nežádoucí efekt lze zmenšit anebo odstranit použitím ozvučnice, která pak tvoří s reproduktorem vlastní vyzařující jednotku.

Ozvučnice jsou řešeny tak, že zvětšují akustickou impedanci mezi přední a zadní stranou membrány a to buď prodloužením dráhy mezi oběma jejími stranami (deskové anebo otevřené skříňové ozvučnice), nebo odstraní nežádoucí vyzařování zadní strany reproduktoru jeho zakrytím nejlépe uzavřenou skříní, případně jiným vhodným prvkem, uplatňujícím se jako akustický obvod. Základním požadavkem kladeným na všechny druhy ozvučnic je dostatečná tuhost jejich stěn, která má vyloučit nebo omezit jejich parazitní kmity.

Reproduktor má být montován do stěny ozvučnice tak, aby jeho ústí pokud možno lícovalo s přední stěnou této ozvučnice (viz obr. 7.1).



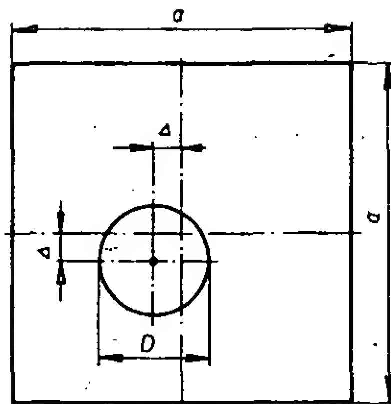
Obr. 7.1. Montáž reproduktoru do ozvučnice; a) montáž zepředu, b) montáž zezadu, reproduktor zapuštěn, c) montáž zezadu (nouzové provedení)

Jako zářič s vyhovujícími přenosovými vlastnostmi může pracovat měnič s dostatečně rozměrnou, pístově kmitající membránou, s obvodem rovném alespoň dvojnásobku délky vlny nejnižšího vyzařovaného signálu. Tak jsou řešeny například elektrostatické reproduktory firmy QUAD a velkoplošné zářiče, z nichž některé mají vestavěn větší počet souběžně se uplatňujících elektrodynamických měničů, rozkmitávajících jedinou membránu z lehčeného pěnového materiálu (popřípadě vhodně povrchově upraveného).

V tomto případě se jedná v podstatě o zářič bez ozvučnice. V dalším budou popsány používané druhy reproduktorových ozvučnic a uvedeny informace, umožňující jejich dimenzování s přihlédnutím k požadovaným přenosovým vlastnostem.

7.1 Deskové ozvučnice

Nejjednodušším typem ozvučnice je ozvučnice desková, kterou se prodlužuje vzdálenost mezi přední a zadní stranou



Obr. 7.2. Desková ozvučnice a příslušné umístění reproduktoru

membrány reproduktoru. Tato ozvučnice se vyznačuje sice jednoduchostí (pokud nemáme na zřeteli komplikace, které přinášejí konkrétní realizace, kdy musí být dbáno na její dostatečnou tuhost), ale má značné rozměry.

Základní uspořádání je patrné z obr. 7.2. Reproduktor má být v ozvučnici, nejlépe přibližně čtvercové, umístěn mírně excentricky, aby se vyloučila interference zvukových vln, která by se projevila při symetrickém uspořádání.

Délka hrany a ozvučnice má být rovna alespoň polovině délky vlny signálu při dolním mezním kmitočtu f_o.

Platí tedy, že

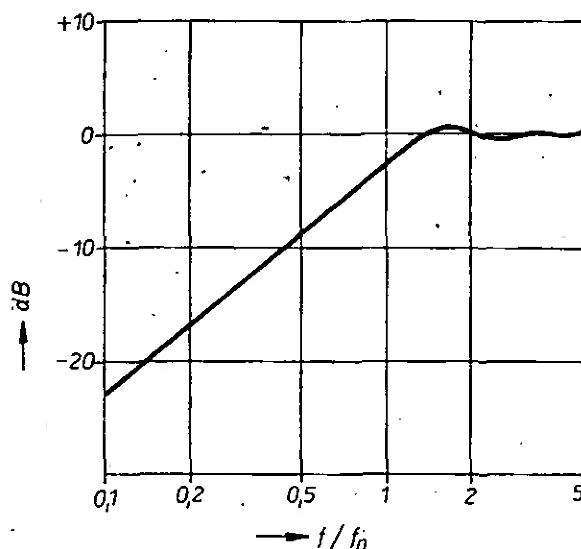
$$a = \lambda/2 = c_0/2f_o \quad (7.1)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku.

Z tohoto výrazu lze určit kmitočet f_o jako funkci délky a hrany ozvučnice:

$$f_o = 172/a \text{ [Hz; m]} \quad (7.2)$$

Na obr. 7.3 je kmitočtový průběh ideálního reproduktoru s membránou kmitající konstantním urychlením (takzvaný „reproduktor řízený hmotností"), vestavěným v této ozvučnici.

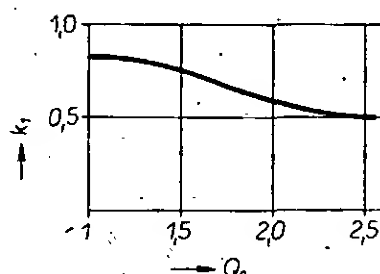


Obr. 7.3. Kmitočtový průběh ideálního reproduktoru v deskové ozvučnici (membrána reproduktoru kmitá s konstantním urychlením)

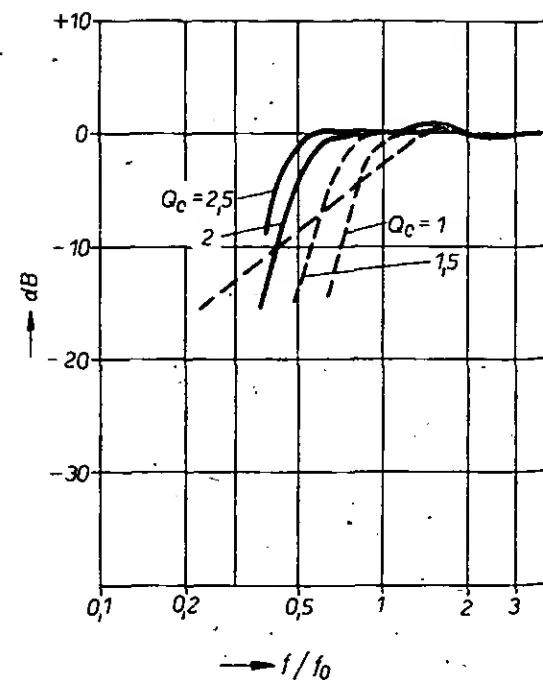
Rozměry ozvučnice lze zmenšit, použije-li se reproduktor o celkovém činiteli jakosti $Q_c > 1$. Pak při dolním mezním kmitočtu zářiče rovném rezonančnímu kmitočtu reproduktoru ($f_d = f_{rez}$) bude f_o ozvučnice

$$f_o = f_{rez}/k_1 \quad (7.3);$$

konstanta k_1 závisí na Q_c reproduktoru (obr. 7.4).



Obr. 7.4. Závislost konstanty k_1 na činiteli jakosti reproduktoru při jeho rezonančním kmitočtu



Obr. 7.5. Kmitočtový průběh reproduktoru o činiteli jakosti $Q_c = 1, 1{,}5, 2$ a $2{,}5$ ve spojení s deskovou ozvučnicí o daném kmitočtu f_o

V daném případě je pak délka strany deskové ozvučnice

$$a = (c_0/2f_{rez})\,k_1 \quad (7.4).$$

Na obr. 7.5 jsou kmitočtové průběhy vyzařovacích jednotek o rozměrech podle vztahu (7.4) s reproduktory o $Q_c = 1, 1{,}5, 2$ a $2{,}5$. Tyto průběhy vznikly složením průběhu podle obr. 7.3 a kmitočtových průběhů reproduktorů s příslušnými celkovými jakostmi Q_c.

Jako příklad stanovíme rozměry deskové ozvučnice pro eliptický reproduktor typu ARE 567, který má tyto hlavní veličiny:

f_{rez} = 117 Hz,
Q_c = 2,
Bl = 167 [T/m],
S = 1,33 dm²,
m_{ak} = 25 kg/m⁴.

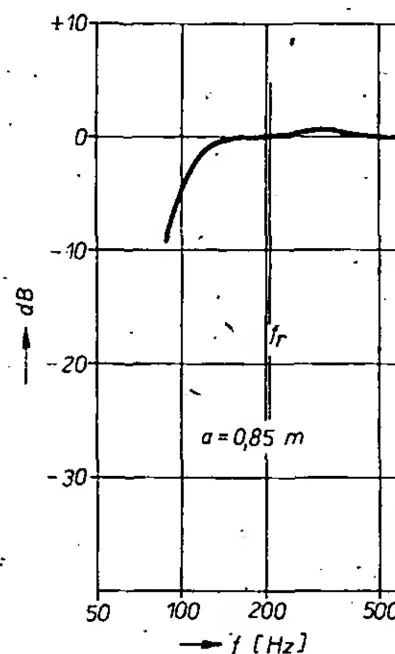
Základní kmitočet ozvučnice pro odpovídající k_1 = 0,58 je

$$f_o = 117 \frac{1}{0{,}58} \doteq 202 \text{ Hz}$$

a příslušná délka strany deskové ozvučnice

$$a = 0{,}85 \text{ m}.$$

Výsledný kmitočtový průběh reproduktoru ARE 567 v deskové ozvučnici o délce hrany 0,85 m, odpovídající grafu na obr. 7.5, je na obr. 7.5a.

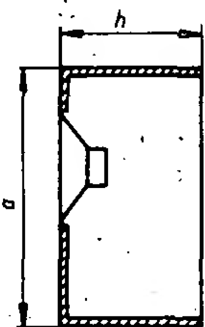


Obr. 7.5a. Kmitočtový průběh reproduktoru o rezonančním kmitočtu 117 Hz a činiteli Q = 2 v optimálně navržené deskové ozvučnici

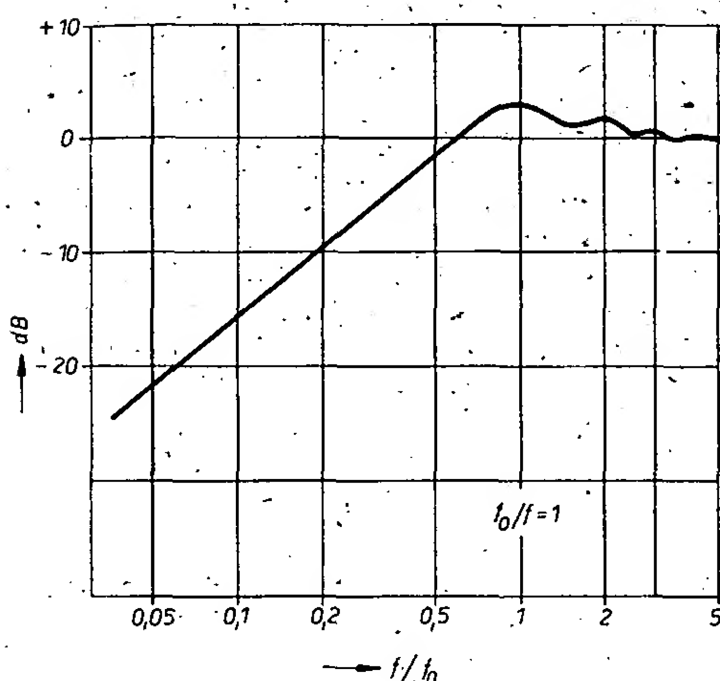
7.2 Otevřená skříňová ozvučnice

Funkce skříňové otevřené ozvučnice je obdobná funkci ozvučnice deskové – ozvučnice prodlužuje dráhu mezi přední a zadní stranou membrány reproduktoru.

Kmitočtový průběh ideálního přímovyzařujícího reproduktoru (s membránou kmitající s kmitočtově nezávislým urychlením) vestavěného ve skříňové ozvučnici podle obr. 7.6 odpovídá křivce uvedené



Obr. 7.6. Schematické uspořádání otevřené skříňové ozvučnice s reproduktory



Obr. 7.7. Kmitočtový průběh ideálního reproduktoru v otevřené ozvučnici

na obr. 7.7. Potom je kmitočet f_0 dán výrazem

$$f_0 \doteq 55/h\sqrt{1+(a/2h)} \qquad (7.5),$$

kde a je délka hrany skříně o čtvercové přední stěně a h její hloubka, která je přibližně $h = a/3$.

Má-li přední stěna skříně obdélníkovitý tvar o rozměrech b a c navzájem se příliš nelišících, lze do výrazu pro f_0 dosadit výraz

$$a = \sqrt{bc}.$$

Větší hloubka h skříně než $a/2$ způsobuje zvlnění výsledného kmitočtového průběhu vyzařovací jednotky.

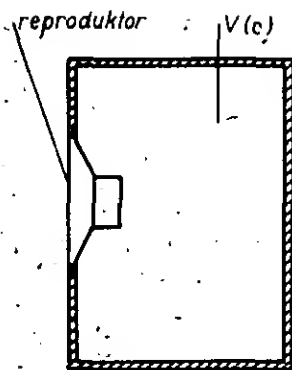
Zvolíme-li $h = a/3$, je dán kmitočet f_0 výrazem

$$f_0 \doteq \frac{104}{a} \quad [\mathrm{Hz; m}] \qquad (7.6)$$

z čehož je patrno, že pro totéž f_0 je rozměr a skříňové ozvučnice asi 60 % délky čelní hrany deskové ozvučnice. Kmitočtový průběh ideálního, hmotou řízeného reproduktoru o mimořádně nízkém rezonančním kmitočtu je na obr. 7.7 (je to analogie obr. 7.3).

Při stanovení rozměrů ozvučnice se postupuje obdobně jako v kapitole 7.1.

Skříňově otevřené ozvučnice se používají zejména u levnějších přijímačů a pak také u levných zářičů určených pro nenáročné ozvučení. Jejich předností je to, že umožňují optimálně využít běžné komerční reproduktory o činiteli jakosti $Q_c > 1$. Vzhledem k tomu, že v okolí rezonančního kmitočtu bývá amplituda membrány



Obr. 7.8. Schematické uspořádání reproduktoru v uzavřené ozvučnici o objemu V

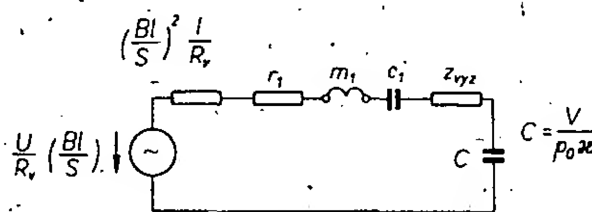
při větším budicím příkonu dosti veliká, nutno u zářiče očekávat v této oblasti větší nelineární zkreslení.

7.3 Uzavřená ozvučnice

Vliv nežádoucího vyzařování zadní strany membrány reproduktoru se spolehlivě odstraní zakrytím této strany uzavřeným pouzdrem. Toto pouzdro představuje uzavřenou ozvučnici o objemu V_{ozv} (obr. 7.8). Reproduktor je v tomto případě na své zadní straně zatížen poddajností $c_v = V_{ozv}/\rho c^2$ tohoto objemu, která způsobí zvýšení rezonančního kmitočtu reproduktoru f_r na f'_r

$$f'_r = f_r\sqrt{\frac{V_{ozv}+V_{ekv}}{V_{ozv}}} = f_r\sqrt{\frac{c_v+c_1}{c_v}} \qquad (7.7)$$

což vyplývá z ekvivalentního schématu na obr. 7.9. Současně s rezonančním kmi-



Obr. 7.9. Zjednodušené ekvivalentní schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici o objemu V (o poddajnosti c)

točtem se ovšem také zvětší i činitel jakosti reproduktoru Q_r na

$$Q'_r = Q_r(f'_r/f_r) \qquad (7.8),$$

který je rozhodující pro vlastnosti vyzařovací jednotky.

Aby se odstranil nežádoucí vliv stojatých akustických vln, které se v oblasti vyšších kmitočtů začnou v dutině ozvučnice uplatňovat a způsobují zvlnění výsledného kmitočtového průběhu, je vhodné ji vyplnit porézním materiálem, absorbujícím zvukovou energii. Nejvhodnější je měkký molitan s otevřenými póry, méně vhodná je vata anebo vatelín, sklovláknitý materiál apod. Pokud se použije porézní molitan (s nímž se pracuje nejlépe), je vhodné aplikovat molitanovou fólii z porézního materiálu o tloušťce nejlépe 3 až 5 mm. Její množství má být přibližně 15 až 20 g na 1 l prostoru ozvučnice. Porézní materiál nejen potlačuje stojaté vlnění v ozvučnici, ale ztrátami v něm vznikajícími se i poněkud zmenšuje výsledný činitel jakosti reproduktoru, především se však jeho vlivem změní původní adiabatická komprese vzduchu v ozvučnici na polytropickou, takže pro výpočet lze uvažovat, že objem ozvučnice je proti jeho skutečné velikosti asi o 10 až 15 % větší (což je na prvý pohled mírně paradoxní, protože výplní se skutečný volný objem dutiny poněkud zmenší).

Za těchto okolností se tedy zvýší rezonanční kmitočet reproduktoru na

$$f''_r = f_r\sqrt{\frac{V_{ozv}(1{,}1\text{ až }1{,}15)+V_{ekv}}{V_{ozv}(1{,}1\text{ až }1{,}15)}} \qquad (7.9)$$

a činitel Q_r na

$$Q''_r = Q_r\frac{f''_r}{f_r} \qquad (7.10)$$

Molitanová fólie se vkládá do ozvučnice nejlépe tak, že se zmačká a rozmístí po celém volném objemu. Předností tohoto uspořádání spočívá v tom, že není nebezpečí, že by způsobovala nežádoucí pazvuky.

Hmotnost výplně poddajnou a porézní molitanovou fólií se volí, jak již bylo řečeno, 15 až 20 g/1 dm³. U vaty je to asi dvojnásobek této hodnoty. V každém případě je vhodné zkontrolovat, zda se vyplněním prostoru ozvučnice příliš nezmenšil činitel Q'_r při rezonančním kmitočtu reproduktoru (nemá být menší než 0,8). Činitel Q'_r se stanoví metodou popsanou v kapitole o měření.

Kmitočtový průběh reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici, pokud vyzařuje do poloprostoru, je dán v oblasti nízkých a středních kmitočtů stejným výrazem, jako kmitočtový průběh samotného reproduktoru (viz rovnice 5.12). Rozdíl je pouze v tom, že za činitel Q samotného reproduktoru je dosazen činitel Q'_r reproduktoru vestavěného ve stěně uzavřené ozvučnice.

Jak patrno z obr. 5.9, optimální kmitočtový průběh má reproduktor pro $Q'_r = 0{,}8$ až 1. Tento poznatek je vhodné mít na zřeteli při návrhu uzavřené ozvučnice pro určitý zvolený typ reproduktoru.

Uzavřené ozvučnice se obvykle používají při řešení hlubokotónových vyzařovacích jednotek, případně jednotek širokopásmových, které se uplatňují jako hlubokotónové i středotónové.

Postup při řešení je tento:

Nejprve se určí pro daný typ reproduktoru, u něhož známe jeho rezonanční kmitočet f_r, činitel Q_r a ekvivalentní objem V_{ekv}, rezonanční kmitočet f'_r reproduktoru upevněného v uzavřené ozvučnici zvolíme $Q'_r = 0{,}9$ až 1,1. (U ozvučnice vyplněné tlumicím materiálem se jakost Q_r zmenší na 0,8 až 1, což je optimální velikost.) Rezonanční kmitočet f'_r tedy bude:

$$f'_r = f_r\frac{Q'_{rc}}{Q_{rc}} = f_r\frac{0{,}9\text{ až }1{,}1}{Q_{rc}} \qquad (7.11)$$

Potřebný objem ozvučnice V_{ozv}, vyplývající z výrazu (7.7), pak je

$$V_{ozv} = V_{ekv}\frac{1}{1{,}1\text{ až }1{,}15}\frac{1}{(f'_r/f_r)^2-1} \qquad (7.12)$$

nebo po dosazení

$$V_{ozv} = V_{ekv}\frac{0{,}87\text{ až }0{,}91}{\left(\frac{0{,}9\text{ až }1{,}1}{Q_{rc}}\right)^2-1} \qquad (7.13).$$

Pro úplnost jsou v tab. 4 nejvhodnější objemy uzavřených ozvučnic pro hlubokotónové reproduktory vyráběné v současné době v ČSSR, včetně hmotnosti tlumicí výplně z molitanové porézní fólie o tloušťce 2 až 5 mm. Údaje v tabulce jsou jen přibližné a informativní, protože základní konstanty reproduktorů se u jednotlivých výrobních sérií poněkud liší. Při konkrétním návrhu ozvučnice je účelné konstanty reproduktorů raději, pokud je to možné, změřit.

V tabulce jsou pro každý typ reproduktoru uvedeny rezonanční kmitočet pro $Q'_r = 1$, optimální objem ozvučnice a dolní mezní kmitočet f'_d, při němž se zmenší úroveň akustického tlaku o 3 dB ($f_d \doteq f_r \cdot 0{,}8$.)

Tab. 4.

Reproduktor	Rez. kmitoč. f'_r reproduktoru v ozvučnici [Hz]	Dolní mezní kmitočet zářiče	Objem ozvučnice [l]
ARN 5604/8	83	66,5	9
ARN 6604/8	55	44	42
ARN 8604/8	68	54,5	44
ARM 934	115	92	81
ARN 932	65	52	126
ARN 734	43	34,5	135

Lze ovšem použít ozvučnice o jiných objemech (například menších, než je uvedeno). Pak však kmitočtový průběh nebude vyrovnaný. Pro některé případy (zejména u menších ozvučnic) lze však využít zvětšení akustického tlaku při rezonančním kmitočtu soustavy k selektivnímu zdůraznění signálů o nízkých kmitočtech.

Při pečlivějším prošetření vlastností reproduktoru, vestavěného v uzavřené ozvučnici, je účelné určit i kmitočtový průběh amplitudy membrány pro zvolený akustický tlak p, měřený při středních kmitočtech v ose reproduktoru ve vzdálenosti ξ [m] od jeho ústí. Amplituda membrány je pro daný případ dána vztahem

$$y = (\xi/\sqrt{2}\pi\varrho)(1/S_m)\overline{p}(1/f_r^2)\,\frac{1}{\left|(q^2-1)-j\frac{q}{Q'_c}\right|}$$

popř. (7.14)

$$y = 0{,}188\,\frac{1}{S_m}\overline{p}\,\frac{1}{f_r^2}\,\frac{1}{\left|(q^2-1)-j\frac{q}{Q'_c}\right|} \qquad (7.14a)$$

kde S_m je plocha membrány, f_r rezonanční kmitočet reproduktoru vestavěného v ozvučnici, q poměrný kmitočet ($f = f_r \cdot q$); Q'_c celkový činitel jakosti reproduktoru vestavěného v ozvučnici a p požadovaný akustický tlak ve vzdálenosti ξ, případně 1 m.

Jako příklad určíme objem uzavřené ozvučnice pro reproduktor ARN 5604, dále jeho kmitočtový průběh pro oblast nízkých kmitočtů a kmitočtový průběh amplitudy membrány při konstantním napětí na vstupu reproduktoru, nutném pro dosažení hladiny akustického tlaku 1 Pa v ose ve vzdálenosti 1 m od jeho ústí.

Nejprve určíme rezonanční kmitočet reproduktoru v uzavřené ozvučnici, při němž bude jeho činitel $Q'_r = 1$.

$$f'_r = 35\,.\,\frac{1}{0{,}42} = 83{,}3\ \text{Hz}.$$

Objem ozvučnice vyplněné tlumicím materiálem (pěnovým molitanem) pak má být

$$V_{ozv} = 45\,.\,\frac{0{,}9}{\left(\frac{83{,}3}{35}\right)^2-1} = 8{,}7\ \text{l}.$$

Kmitočet, při němž se hladina akustického tlaku zmenší o 3 dB, je

$$f_d = 0{,}8\,.\,83{,}3 \doteq 66{,}6\ \text{Hz}.$$

Pro kontrolu si stanovíme amplitudu membrány pro hladinu akustického tlaku 94 dB ve vzdálenosti 1 m před membránou jednak pro rezonanční kmitočet ($q = 1$), jednak pro dolní mezní kmitočet ($q = 0{,}8$).

Hladině 94 dB odpovídá akustický tlak $p = 1$ Pa. Pak je amplituda membrány pro $q = 1$

$$y = 0{,}188\,\frac{1}{S}\,\frac{1}{f_r^2}\,p =$$

$$= 0{,}188\,\frac{1}{1{,}4.10^{-2}}\,\frac{1}{83{,}3^3}\,1 = 1{,}94\ \text{mm}$$

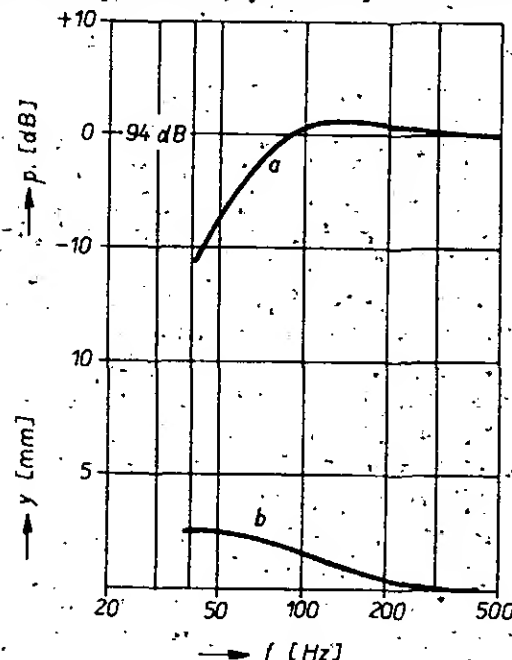
a pro $q = 0{,}8$ ($f = 0{,}8\,.\,83{,}3 = 66{,}6$ Hz), kdy se kmitočtový průběh sníží o 2,7 dB

$$y = 0{,}188\,\frac{1}{S}\,\frac{1}{f_r^2}\,p =$$

$$= 0{,}188\,\frac{1}{\left|(0{,}8^2-1)-j\frac{0{,}8}{1}\right|} = 2{,}2\ \text{mm}.$$

Kmitočtový průběh hladiny akustického tlaku a amplitudy membrány pro akustický tlak 1 Pa ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru je v grafu na obr. 7.10.

Pro úplnost je vhodné uvést vztah pro citlivost vyzařovací jednotky s uzavřenou



Obr. 7.10. Kmitočtový průběh reproduktoru ARN 5604 v uzavřené ozvučnici o objemu V = 8,7 l; a) průběh hladiny akustického tlaku ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru; b) průběh amplitudy membrány

ozvučnicí, analogický vztahu pro samotný reproduktor. Pro citlivost platí vztah

$$\eta_{dB} = 52{,}1 + 10\log(f_r^3 V_c/Q_{el})\quad [\text{dB}/\sqrt{\text{VA}}/\text{m; Hz, m}^3] \qquad (7.15)$$

kde f_r je rezonanční kmitočet reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici, Q_{el} jeho elektrický činitel kvality a V_c objem, daný paralelní kombinací ekvivalentního objemu reproduktoru a objemu ozvučnice

$$V_c = \frac{V_{ekv}V_{ozv}}{V_{ekv}+V_{ozv}}.$$

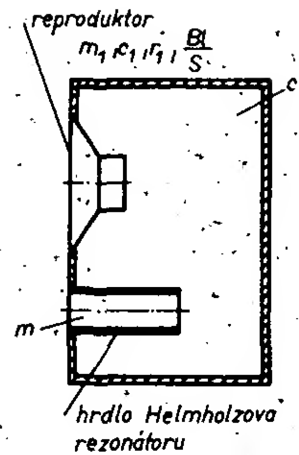
Tento vztah platí ovšem pro vyzařování do poloprostoru. Při vyzařování do plného prostoru je v oblasti nízkých kmitočtů citlivost o 6 dB menší.

Je zřejmé, že mezi rezonančním kmitočtem vyzařovací jednotky a objemem ozvučnice (Q_{el} bývá obvykle přibližně rovno 1) jednoznačná souvislost. Z toho je patrné, že nelze zhotovit jednotku o velmi nízkém dolním mezním kmitočtu, malém objemu a velké citlivosti.

Optimální kmitočtový průběh se získá při $Q_{el} \doteq 0{,}9$. Je-li současně $V_{ekv} \doteq 4V_{ozv}$ (tedy $V_c \doteq V_{ozv} \cdot 0{,}8$), je pro zvolený dolní mezní kmitočet f_d a objem ozvučnice V_{ozv} dosažitelná citlivost

$$\eta_{dB} = 51{,}6 + 10\log f_d^3 V_{ozv}\quad [\text{dB}/\sqrt{\text{VA}}/\text{m; Hz, m}^3] \qquad (7.16).$$

Správnost návrhu vyzařovací jednotky s uzavřenou ozvučnicí lze ověřit jednak měřením průběhu elektrické vstupní impedance použitého reproduktoru, jednak měřením výsledného kmitočtového průběhu akustického tlaku a to nejlépe v blízkém akustickém poli. Podrobnosti budou uvedeny v kapitole o měření reproduktorů a reproduktorových soustav.



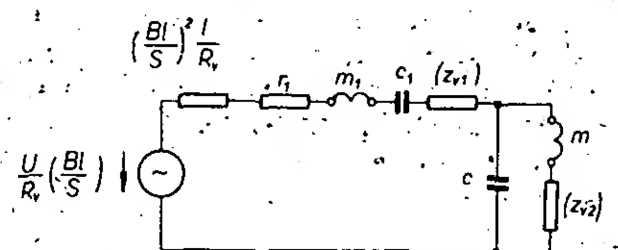
Obr. 7.11. Schematické uspořádání bass-reflexové ozvučnice

7.4 Bass-reflexová ozvučnice

Základní uspořádání bass-reflexové ozvučnice s přímovyzařujícím reproduktorem je na obr. 7.11. Reproduktor je umístěn ve stěně ozvučnice a na své zadní straně je zatížen obvodem Helmholzova rezonátoru, jehož ústí tvoří buď otvor nebo hrdlo ve tvaru nátrubku. V oblasti rezonančního kmitočtu rezonátoru ($f_{ozv} = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc}}$) je zadní strana reproduktoru zatížena poměrně velkou akustickou impedancí rezonátoru, přičemž vzduch proudící jeho hrdlem objemovou rychlostí w podporuje významnou měrou vyzařování přední strany membrány. Při rezonančním kmitočtu ozvučnice se amplituda membrány reproduktoru podstatně zmenšuje.

Nespornou předností vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí ve srovnání se zářičem s uzavřenou ozvučnicí, při daném dolním mezním kmitočtu jsou její menší rozměry a zejména pak větší citlivost.

Vlastnosti vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí vyplývají z ekvivalentního schématu na obr. 7.12, z jehož rozboru vyplývá jak její výsledný kmitočtový průběh, tak i průběh amplitudy membrány. Také v tomto případě se předpokládá, že jednotka vyzařuje do poloprostoru.



Obr. 7.12. Zjednodušené ekvivalentní schéma reproduktoru v bass-reflexové ozvučnici

Vedle základních veličin reproduktoru (f_r, m_1, c_1, S, $Q_{c,r}$, Bl/S) je nutno znát také vlastnosti ozvučnice:

$f_{ozv} = \frac{59{,}55}{\sqrt{mV_{ozv}}}$ [Hz] rezonanční kmitočet ozvučnice (7.17),

V_{ozv} [m³] objem ozvučnice,

m [kg/m⁴] akustická hmotnost vzduchu v hrdle ozvučnice,

$Q_B = \frac{2\pi f_{ozv} m}{r}$ činitel jakosti ozvučnice (7.18),

r akustický odpor charakterizující ztráty ozvučnice,

$\gamma = \frac{m}{m_1}$ poměr akustické hmotnosti vzduchu v hrdle ozvučnice a hmotnosti systému reproduktoru (7.19),

$f = qf_{ozv}$ [Hz] kmitočet (7.20),

$$\nu = \frac{f_{ozv}}{f_r} \qquad (7.21),$$

$$\overline{Q}_{c,ozv} = Q_{c,r}\frac{f_{ozv}}{f_r} \qquad (7.22),$$

$$\overline{Q}_{el,ozv} = Q_{el,r}\frac{f_{ozv}}{f_r} \qquad (7.23).$$

Pro úplnost je uveden zjednodušený vztah pro kmitočtový průběh reproduktoru ve spojení s bass-reflexovou ozvučnicí a průběh amplitudy membrány reproduktoru pro případ, kdy je činitel jakosti ozvučnice Q_B dostatečně veliký (≧20), což u pečlivě provedené ozvučnice, při membráně s kmitací cívkou uzavřenou kupolkou a neprodyšných poddajných vlnách může být splněno. Při menších činitelích Q_B bývá ovlivněn kmitočtový průběh v blízkosti f_{ozv}:

$$p = \frac{\overline{p}}{\xi}\frac{q^4}{\left|\left[(q^2-1)(q^2-\frac{1}{\nu^2})-q^2\gamma\right]+j(q^2-1)\frac{q}{\overline{Q}_{c,ozv}}\right|} \qquad (7.24)$$

$$y = 0{,}188\,\xi\,\frac{1}{S}\frac{p}{f^2_{ozv}}\frac{1}{\left|\left[\gamma\frac{q^2}{1-q^2}+q^2-\frac{1}{\nu^2}\right]\pm j\frac{q}{\overline{Q}_{c,ozv}}\right|} \qquad (7.25)$$

Kmitočtové průběhy akustického tlaku p závisí značně na činiteli $\overline{Q}_{c,ozv}$ a na poměru m/m_1 (=γ), poměrně však málo na poměru rezonančního kmitočtu ozvučnice f_{ozv} a rezonančního kmitočtu reproduktoru f_r, čili na ν, pokud je ≧ 1. Důležité však je, že pro dolní mezní kmitočet f_d vyzařující jednotky, tedy pro kmitočet, při němž neklesá kmitočtový průběh více než o 1 až 3 dB, lze dostatečně přesně psát

$$f_d \doteq f_{ozv}\sqrt{\gamma} \qquad (7.26),$$

což platí pro γ ≧ 1.

Tento poznatek lze účelně využít při předběžném návrhu bass-reflexové ozvučnice, jak bude uvedeno dále.

V každém případě se však doporučuje kontrola amplitudy membrány podle výrazu (7.25), nebo je třeba alespoň přibližně zjistit, není-li v nadrezonanční oblasti při zvoleném akustickém tlaku p_1 překročena maximální přípustná amplituda y_{max}.

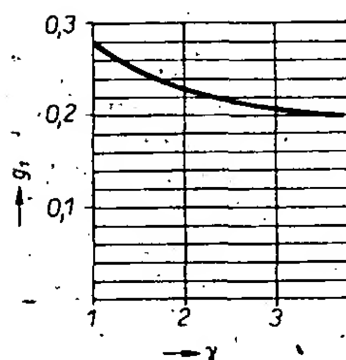
Pro přibližné, ale pro běžnou praxi postačující zjištění maximální amplitudy membrány pro zvolený akustický tlak p_1 [Pa] ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru lze vycházet ze vztahu

$$y_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\varrho}\frac{1}{S_m}\frac{\overline{p}_1}{f^2_{ozv}}g_1 \quad \text{[m; Pa, m}^2\text{, Hz]} \qquad (7.27)$$

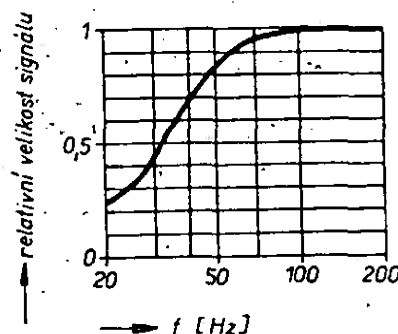
$$y_{max} = 1{,}88.10^{-2}\frac{1}{S_m}\frac{\overline{p}_1}{f^2_{ozv}}g_1 \quad \text{[mm; m}^2\text{, Pa, Hz]}$$

kde g_1 pro známé γ ozvučnice lze zjistit z grafu na obr. 7.13.

Pro případ, že je dolní mezní kmitočet vyzařovací jednotky nižší než 100 Hz, což je obvyklé, je účelné brát ohled na spektrální složení přirozeného akustického signálu, u něhož se v oblasti pod 100 Hz snižuje hladina akustického tlaku (viz obr. 7.14). Pak za p_1 je nutno dosadit redukovanou velikost $p'_1 = p_1k_k$, a to odpovídající kmitočtu f_m, při němž je amplituda membrány maximální (pro hrubou informaci postačí, uvažujeme-li $f_m = \sqrt{2}f_{ozv}$.)



Obr. 7.13. Graf pro přibližné stanovení maximální amplitudy membrány reproduktoru v bass-reflexové ozvučnici (závislost g_1 na γ)



Obr. 7.14. Poměrná hodnota složek spektra přirozeného signálu podle IEC (viz obr. 5.14) pro stanovení amplitudy membrány reproduktoru

Při podrobnějším výpočtu je nutno stanovit kmitočtový průběh amplitudy membrány odpovídající výrazu 7.25.

Vedle maximální výchylky membrány je účelné určit i maximální rychlost vzduchu v_{max} proudícího hrdlem ozvučnice, která nemá překročit špičkovou hodnotu 10 m/s. Rychlost lze určit s dostatečnou přesností ze vztahu

$$v_{max} = 1{,}5\frac{p_1}{D_h^2 f_{ozv} q^2} \quad \text{[m/s; Pa, m, Hz, –]} \qquad (7.28).$$

Akustický tlak p_1 je skutečná hodnota, kterou vytvoří vyzařovací jednotka ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru při vyzařování do poloprostoru, q je relativní kmitočet ($q = \frac{f}{f_{ozv}}$), f_{ozv} rezonanční kmitočet ozvučnice a D_h vnitřní průměr hrdla ozvučnice.

Důležitým prvkem Helmholzova rezonátoru a tím i bass-reflexové ozvučnice je akustická hmota m, daná hmotností vzduchu kmitajícího v hrdle rezonátoru, tvořeného buď pouhým otvorem ve stěně (obvykle přední) ozvučnice, nebo hrdlem o světlosti D_h a délce l.

Akustická hmotnost vzduchu v takovém hrdle je dána vztahem

$$m = \varrho\left(\frac{3{,}4}{\pi D_h} + \frac{4l}{\pi D_h^2}\right) \quad \text{[kg/m}^4\text{; kg/m}^3\text{; m]} \qquad (7.29),$$

kde první člen představuje akustickou hmotnost vzduchu na konci nátrubku, druhý člen hmotnost vzduchu ve vlastním nátrubku a ϱ je specifická hmotnost vzduchu (ϱ = 1,2 kg/m^3).

Pro úplnost je uveden základní vztah pro dosažitelnou citlivost zářiče s bass-reflexovou ozvučnicí:

$$\eta_{dB} = 52{,}1 + 10\frac{f_d^3 V}{\overline{Q}_{ozv}\gamma} \quad \text{[dB/VA/m]} \qquad (7.30).$$

Jak patrno, největší citlivosti pro daný dolní mezní kmitočet se dosáhne při γ = 1. Protože, jak bylo již uvedeno, nejvyrovnanější kmitočtový průběh je při $\overline{Q}_{ozv}$ = 0,4, je při objemu ozvučnice V a dolním mezním kmitočtu d_d největší dosažitelná citlivost

$$\eta_{dB} = 56{,}1 + 10\log f_d^3 V \qquad (7.31),$$

která je za optimálních podmínek asi o 4 až 4,7 dB větší než citlivost zářiče o stejném dolním mezním kmitočtu a stejném objemu při aplikaci uzavřené ozvučnice. Pro využití této možnosti musí být ovšem k dispozici reproduktor potřebných vlastností.

U bass-reflexové ozvučnice je zajímavý kmitočtový průběh vstupní impedance použitého reproduktoru, který vykazuje dvě maxima a jedno minimum; to při rezonančním kmitočtu ozvučnice f_{ozv}. Dvě maxima impedance nastávají přibližně při kmitočtech

$$f_{1;2} = (f_{ozv}/\sqrt{2})(\sqrt{2+\gamma \pm \sqrt{\gamma(4+\gamma)}}) \qquad (7.32).$$

Z elektrické impedance reproduktoru měřené při rezonančním kmitočtu ozvučnice lze určit při známých vlastnostech reproduktoru (Bl, R_v, S) činitel jakosti Q_B použitého Helmholzova rezonátoru, který je

$$Q_B = (Bl/S)^2\frac{1}{\Delta R}2\pi f_{ozv}\frac{V}{\varrho c^2} \qquad (7.33).$$

Z velikosti Q_B lze usuzovat na kvalitní provedení ozvučnice, zejména na ztráty v nátrubku a na netěsnosti ozvučnice, včetně netěsností membrány reproduktoru. Činitel Q_B má být větší než 10.

Veličina ΔR ve vztahu (7.33) je rozdíl vstupní impedance Z_{ozv} reproduktoru při rezonančním kmitočtu ozvučnice a činného odporu kmitací cívky reproduktoru, tedy $\Delta R = Z_{ozv} - R_v$. Důležité přitom je, aby se měření uskutečnilo při malém zatížení reproduktoru, nejvýše při 1/10 jmenovitého příkonu, aby se odpor vinutí kmitací cívky nezměnil proti klidové velikosti.

V dalším je uveden postup při návrhu bass-reflexové ozvučnice pro hlubokotónový reproduktor známých vlastností. Použitý reproduktor má mít neprodyšnou membránu a neprodyšné poddajné vlnky. Střed membrány reproduktoru musí být zakryt neprodyšnou kopulkou.

Při návrhu ozvučnice stanovíme nejprve její rezonanční kmitočet tak, aby $\overline{Q}_{c,ozv}$ = 0,4 až 0,45.

$$\text{Pak} \quad f_{ozv} = f_r\frac{0{,}4 \text{ až } 0{,}45}{Q_r} \qquad (7.34),$$

přičemž má být f_{ozv}/f_r ≧ 0,8 (7.35),

kde f_r je rezonanční kmitočet reproduktoru.

Dále si zvolíme dolní mezní kmitočet f_d vyzařovací jednotky tak, aby

$$f_d = f_{ozv}\,(1 \text{ až } 2)$$

a tím i $\gamma = (f_d/f_{ozv})^2$, které nemá být větší než 4.

Výhodné jsou menší γ (do γ = 2), při nichž se účinně využije zmenšení amplitudy membrány v nadrezonanční oblasti ozvučnice. Dolní mezní kmitočet zářiče nesmí být příliš vzdálen od rezonančního kmitočtu ozvučnice.

Objem V ozvučnice se pro daný reproduktor určí ze vztahu

$$V = \frac{\varrho c^2}{(2\pi f_d)^2 m_1}10^3 = \frac{3{,}55.10^6}{f_d^2 m_1} \quad \text{[l; kg/m}^4\text{, Hz]} \qquad (7.36),$$

kde m_1 je akustická hmotnost kmitacího systému použitého reproduktoru. Uvedený výraz vyjadřuje vzájemnou souvislost mezi dolním mezním kmitočtem f_d zářiče a objemem V ozvučnice. Jak patrno, rozhodující význam má akustická hmotnost m_1 kmitacího systému reproduktoru, která bývá větší u reproduktorů malých průměrů.

Akustická hmotnost vzduchu v hrdle rezonátoru je

$$m = m_1(f_d/f_{ozv})^2 \quad (= m_1\gamma) \qquad (7.37).$$

Zvolíme-li průměr nátrubku D_h [m], bude jeho délka l

$$l = 0{,}654D_h\,(D_h m - 1{,}3) \qquad [\mathrm{m;\ m,\ kg/m^4}] \qquad (7.38).$$

Tato délka musí být volena tak, aby se nátrubek do ozvučnice bez obtíží vešel, to znamená, že mezi jeho koncem a zadní stěnou ozvučnice musí být vzdálenost větší (nejvýše rovná) než je průměr hrdla ozvučnice. Pokud má hrdlo obdélníkovitý průřez, může být vzdálenost mezi vnitřním ústím hrdla a nejbližší stěnou alespoň rovna jeho menšímu rozměru (šířce).

Minimální plocha hrdla je omezena maximální přípustnou rychlostí vzduchu v něm vznikající, jak je uvedeno dále.

Tím jsou stanoveny hlavní údaje ozvučnice. Postup při návrhu a jeho kontrole nejlépe osvětlí příklad.

Navrhněme vyzařovací jednotku s bass-reflexovou ozvučnicí pro reproduktor ARN-5604. Při návrhu vycházíme z údajů reproduktoru v tab. 2.

Rezonanční kmitočet ozvučnice:

$$f_{ozv} = f_r\frac{0{,}4}{Q_r} = 35\frac{0{,}4}{0{,}42} = 33{,}3\ \mathrm{Hz}.$$

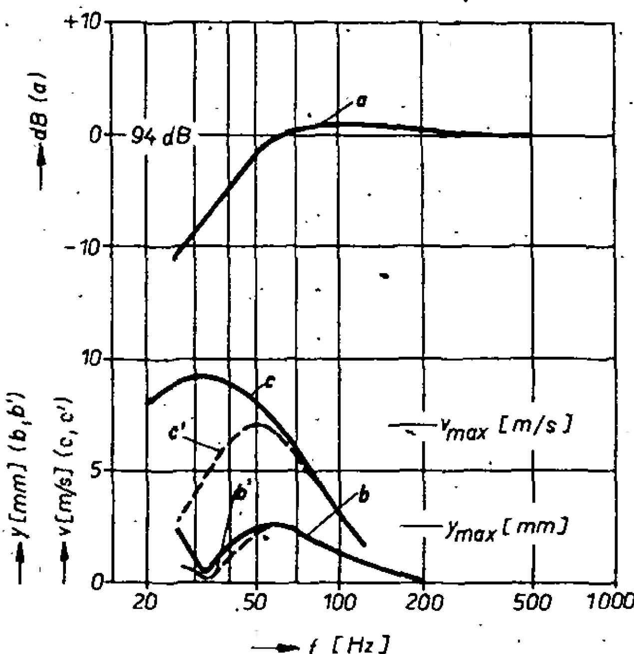
Podmínka $\frac{f_{ozv}}{f_r} = \frac{33{,}3}{35} = 0{,}95 > 0{,}8$ je splněna.

Dolní mezní kmitočet zářiče

$$f_d = f_{ozv}\,(1 \text{ až } 2) = 33{,}3\,.\,1{,}5 = 50\ \mathrm{Hz}.$$

Objem ozvučnice

$$V = \frac{3{,}55.10^6}{m_1 f_d^2} = \frac{3{,}55.10^6}{64.50^2} = 22{,}2\ \mathrm{l}.$$



Obr. 7.15. Kmitočtový průběh zářiče s bass-reflexovou ozvučnicí o objemu 22,8 l a reproduktorem ARN 5604 (a) f_{ozv} = 33,3 Hz, Q_{ozv} = 0,4, průběh amplitudy membrány (b) a průběh rychlosti vzduchu v hrdle rezonátoru (c) při konstantním vstupním napětí reproduktoru a při buzení přirozeným signálem (b', c')

Hmotnost vzduchu v hrdle zvukovodu

$$m = m_1\left(\frac{f_d}{f_{ozv}}\right)^2 = 64\left(\frac{50}{33{,}3}\right)^2 = 144{,}3\ \mathrm{kg/m^4}.$$

a

$$\gamma = \left(\frac{50}{33{,}3}\right)^2 = 2{,}25.$$

Hrdlo zhotovíme z novodurové trubky o světlosti 45 mm. Potřebná délka hrdla

$$l = 0{,}654.45.10^{-3}\,(45.10^{-3}.144{,}3 - 1{,}3) = 0{,}153\ \mathrm{m}.$$

Maximální amplituda membrány bude při konstantním vstupním napětí na svorkách reproduktoru a akustickém tlaku p_1 = 1 Pa ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru

$$y_{max} = 188\frac{1}{S}\frac{p_1}{f^2_{ozv}}g_1 =$$

$$= 188.\frac{1}{1{,}4.10^{-2}}.\frac{1}{33{,}3^2}.0{,}22 = 2{,}66\ \mathrm{mm},$$

přičemž při f_{ozv} (33,3 Hz) se relativní úroveň akustického tlaku zmenší o

$$20\log\gamma = 7\ \mathrm{dB},$$

a při f_d = 50 Hz pouze o 2 dB.

Závěrem si určíme maximální rychlost vzduchu v hrdle rezonátoru při dolním mezním kmitočtu f_d = 50 Hz

$(q = \frac{50}{33{,}3} = 1{,}5)$ ze vztahu (7.28):

$$v_{max} = 1{,}5\frac{1}{(45.10^{-3}).33{,}3.1{,}5^2} = 10\ \mathrm{m/s}.$$

Protože však při 50 Hz lze očekávat u přirozeného signálu pokles akustického tlaku na 0,85 hodnoty při středních kmitočtech při současném poklesu kmitočtové charakteristiky zářiče asi o 2 dB, bude špičková rychlost vzduchu v hrdle

$$v_{max}\,.\,0{,}85\,.\,0{,}79 = 6{,}75\ \mathrm{m/s},$$

což je přijatelné.

Veškeré kmitočtové průběhy, které byly určeny podle dříve uvedených vztahů, jsou pro informaci uvedeny na obr. 7.15.

V případě, že chceme pro daný reproduktor navrhnout ozvučnici o zvoleném objemu V, určíme si nejprve ze vztahu (7.36) její dolní mezní kmitočet f_d a z podílu f_d a rezonančního kmitočtu reproduktoru velikost $\gamma = \left(\frac{f_d}{f_{ozv}}\right)^2$

Tak lze například pro ozvučnici o objemu V = 12 l a reproduktor ARN 5604 určit jednak rozměry potřebného hrdla, jednak přenosové vlastnosti zářiče.

S ohledem na vlastnosti zvoleného reproduktoru je nutno volit obdobný rezonanční kmitočet ozvučnice jako v předešlém případě. Vzhledem k tomu, že se jedná o malou vyzařovací jednotku s vyšším dolním mezním kmitočtem, lze připustit poněkud větší zvlnění kmitočtového průběhu související s poněkud větším činitelem Q_{ozv}, který pro daný případ zvolíme na horní možné mezi (tedy 0,45). Pak bude

$$f_{ozv} = 35\frac{0{,}45}{0{,}43} = 37{,}5\ \mathrm{Hz}.$$

Dolní kmitočet bude v tomto případě

$$f_d = 1{,}88.10^3/\sqrt{m_1 V} \quad [\mathrm{Hz;\ kg/m^4,\ l}] \qquad (7.36a)$$

f_d = 67,8 Hz.

Pak

$$\gamma = \left(\frac{67{,}8}{37{,}5}\right)^2 = 3{,}27,$$

což je hodnota značně velká, která naznačuje, že se již nebudou příliš lišit elektroakustické vlastnosti zářiče s bass-reflexovou ozvučnicí od zářiče s uzavřenou ozvučnicí stejného objemu.

Akustická hmotnost v hrdle ozvučnice

$$m = m_1\gamma = 64\,.\,3{,}27 = 209.$$

Pak bude délka hrdla o světlosti D_h = 32 mm

$$l = 0{,}654.3{,}2.10^{-2}\,(3{,}2.10^{-2}.209 - 1{,}3) = \doteq 11\ \mathrm{cm}.$$

Jak je z uvedeného zřejmé, je pro daný typ reproduktoru možno navrhnout a realizovat celou řadu bass-reflexových ozvučnic s různými dolními mezními kmitočty, z nichž jednoznačně vyplývá příslušný objem ozvučnice.

Z podrobnějších analýz uzavřených a bass-reflexových ozvučnic vyplývá poznatek, že bass-reflexová ozvučnice je účelná, je-li její objem

$$V \geqq \frac{V_{ekv}}{(0{,}85 \text{ až } 1/Q_{rc})^2 - 1} \qquad (7.39)$$

nebo její dolní mezní kmitočet f_d nižší než

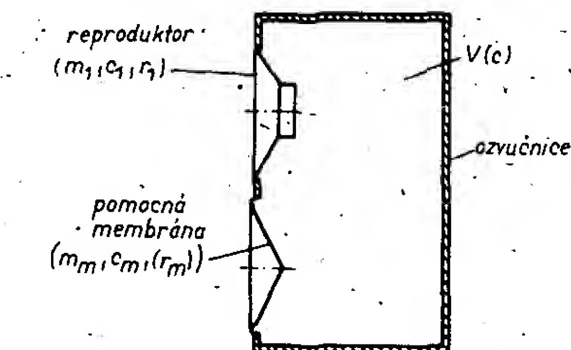
$\frac{0{,}85}{Q_r}f_r$:

tedy

$$f_d \leqq \frac{0{,}85}{Q_r}f_r \qquad (7.40).$$

7.5 Bass-reflexová ozvučnice s pomocnou membránou

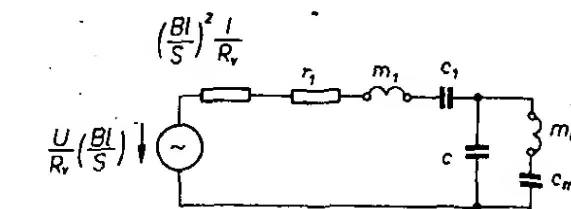
Zvláštní modifikace bass-reflexové ozvučnice, u níž je akustická hmotnost Helmholzova rezonátoru reprezentována hmotností membrány, je na obr. 7.16.



Obr. 7.16. Schematické uspořádání bass-reflexové ozvučnice s pomocnou (pasívní) membránou

Pomocná membrána o akustické hmotnosti m_m a poddajnosti c_m musí mít rezonanční kmitočet f_m značně nižší, než je rezonanční kmitočet ozvučnice.

Ekvivalentní schéma tohoto typu ozvučnice je na obr. 7.17, které v podstatě odpovídá až na větev m_m, c_m (akustická hmotnost pomocné membrány a její akustická poddajnost) ekvivalentnímu schématu klasické bass-reflexové ozvučnice (viz obr. 7.12).



Obr. 7.17. Zjednodušené ekvivalentní schéma reproduktoru v ozvučnici podle obr. 7.16

Je-li rezonanční kmitočet pomocné membrány $f_{m,rez}$, nastane paralelní rezonance obvodu c, m_m, c_m při kmitočtu f_{ozv}, který je vlastně rezonančním kmitočtem tohoto modifikovaného typu Helmholzova rezonátoru

$$f_{ozv} = f_{m,rez}\sqrt{\frac{c_m + c}{c}} \qquad (7.41).$$

Poměr rezonančního kmitočtu ozvučnice a rezonančního kmitočtu pomocné membrány označíme písmenem μ

$$\mu = \frac{f_{ozv}}{f_{m,rez}} = \sqrt{\frac{c_m+c}{c}} = \sqrt{\frac{V_{m,ekv}+V}{V}} \quad (7.42).$$

Současně platí pro rezonanční kmitočet ozvučnice základní vztah (rezonance obvodu c, c_m a m_m)

$$f_{ozv} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c_m c}{c_m+c} m_m} \quad (7.43)$$

kde m_m je akustická hmotnost pomocné membrány. Podobně jako u klasického bass-reflexu si označíme poměr akustické hmotnosti pomocné membrány m_m a akustické hmotnosti membrány reproduktoru symbolem γ_1:

$$\gamma_1 = \frac{m_m}{m_1} \quad (7.44).$$

Kmitočtový průběh vyzařovací jednotky s pomocnou membránou je dán zjednodušeným vztahem

$$\frac{\overline{p}}{\xi} = \frac{q^4}{\left|\left[(q^2-1)(q^2-\frac{1}{\nu^2})-\gamma_1(q^2-\frac{1}{\mu^2})\right]+j\frac{q}{Q}(q^2-1)\right|} \quad (7.45),$$

kde symboly ν a q mají stejný význam jako ve vztahu 7.24 pro kmitočtový průběh zářiče s klasickou bass-reflexovou ozvučnicí.

Podobně jako bylo třeba u klasické bass-reflexové vyzařovací jednotky kontrolovat maximální rychlost vzduchu, je nutno v daném případě zjišťovat, zda pro zvolený akustický tlak p, uvažovaný ve vzdálenosti ξ, není překročena možná amplituda y_{max} pomocné membrány, která je dána výrazem

$$y_{max} = \xi\frac{240\overline{p}}{D^2_m f^2_{ozv} q^3} \text{ [mm; Pa, m, Hz]} \quad (7.46).$$

Při návrhu ozvučnice s pomocnou membránou se obvykle vychází ze zvoleného reproduktoru o známých velikostech základních veličin ($Q_{r,celk}$, f_r, m_1, y_{max}). U pomocné membrány je nutno znát její akustickou hmotnost m_m a akustickou poddajnost c_m, případně odpovídající ekvivalentní objem ($V_{m,ekv} = c_m \,.\, 1,4 \,.\, 10^5$) a její plochu S_m, případně aktivní průměr D_m.

Podobně jako při návrhu klasické bass-reflexové ozvučnice se určí její rezonanční kmitočet f_{ozv} ze vztahu

$$f_{ozv} = f_r\,(0,35 \text{ až } 0,4/Q_{r,c}) \quad (7.47)$$

a objem ozvučnice V ze zvoleného dolního kmitočtu f_d

$$V = \frac{1}{(2\pi f_d)^2}\frac{\rho_0 c^2}{m_1} = \frac{3,54.10^6}{f_d^2 m_1} \text{ [l; Hz, kg/m}^4\text{]} \quad (7.48)$$

kde m_1 je akustická hmotnost membrány použitého reproduktoru.

Potřebnou celkovou akustickou hmotnost membrány $m_{m,celk}$ určíme ze vztahu

$$m_{m,celk} = \frac{1}{(2\pi f_{ozv})^2}\frac{V_{m,ekv}+V}{V_{m,ekv}V}\rho_0 c^2 \quad (7.49)$$

čili

$$m_{m,celk} = \frac{1}{f_{ozv}^2}\frac{V_{m,ekv}+V}{V_{m,ekv}V}3,55.10^6$$

$$\text{[kg/m}^4\text{; l, Hz]} \quad (7.50);$$

potřebná mechanická hmotnost membrány tedy bude

$$m_{m,mech} = m_{m,celk}S_m^2 \quad (7.51)$$

Je-li původní mechanická hmotnost membrány $m_{m,m}$, je nutno na ni přidat závaží o hmotnosti

$$m_{přid} = m_{m,mech} - m_{m,m} \quad (7.52).$$

Pomocná membrána má mít co největší poddajnost (co nejnižší rezonanční kmitočet), aby se poměr m_m/m_1 co nejvíce blížil čtverci podílu f_d/f_{ozv}:

$$\frac{m_m}{m_1} \to \left(\frac{f_d}{f_{ozv}}\right)^2.$$

Aplikace pomocné membrány je na místě v takovém případě, kdy u klasické bass-reflexové jednotky vychází příliš malý průměr nebo příliš velká délka nátrubku, případně nadměrná rychlost vzduchu v nátrubku.

Jako příklad určíme základní rozměry bass-reflexové ozvučnice a potřebné údaje k její realizaci opět pro reproduktor ARN 5604 (pro nějž již byla navržena v předešlé kapitole klasická bass-reflexová ozvučnice). Předpokládáme přitom, že jako pomocná membrána bude použit stejný typ membrány (včetně poddajného uložení) jako u reproduktoru ARN 5604 ($V_{ekv} \doteq 45$ l, $m_m \doteq 40$ (7,8 g)).

Nejprve určíme rezonanční kmitočet ozvučnice

$$f_{ozv} = 35\frac{0,4}{0,42} = 33,3 \text{ Hz}.$$

Pro zvolený dolní mezní kmitočet $f_d = 50$ Hz je nutný objem ozvučnice

$$V = \frac{3,55.10^6}{50^2.64} = 22,1 \text{ l}.$$

Celková akustická hmotnost membrány se získá dosazením do rovnice (7.48):

$$m_m = \frac{1}{33,3^2}\frac{45+22,1}{45.22,1} \,.\, 3,55 \,.\, 10^6 = 215 \text{ kg/m}^4$$

$$\text{Poměr } \frac{m_m}{m_1} = \gamma_1 = \frac{215}{64} = 3,36.$$

Pomocná membrána musí mít mechanickou hmotnost

$$m_{mech} = m_{ak}S_m^2 = 215.(1,4.10^{-2})^2.10^3 \text{ g} = 42 \text{ g}.$$

Její původní hmotnost 7,8 g nutno tedy zvětšit na potřebnou velikost závažím 34,3 g.

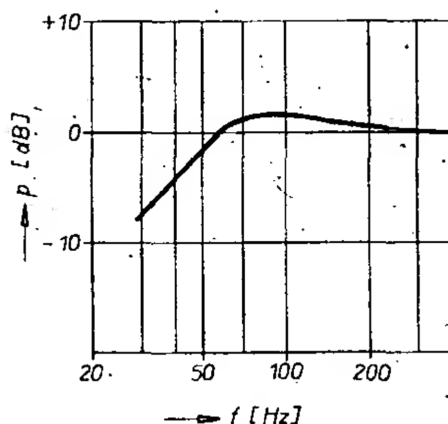
Konečně určíme dosazením do vztahu (7.42) velikost μ,

$$\mu = \frac{f_{ozv}}{f_{m\,rez}} = \sqrt{\frac{45+22,1}{22,1}} = 1,74.$$

Rezonanční kmitočet samotné pomocné membrány bude tedy $f_{m\,rez} = 19,1 \text{ Hz} \left(= \frac{33,3}{1,74}\right)$.

Pro vyzařovací jednotku lze stanovit dosazením do vztahu 7.45 výsledný kmitočtový průběh, který je pro daný případ na obr. 7.18.

Pro úplnost si zkontrolujeme amplitudu pomocné membrány při dolním mezním kmitočtu, při němž původní předpokládaná hladina akustického tlaku



Obr. 7.18. Kmitočtový průběh vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí s pomocnou membránou; $f_{ozv} = 33,3$ Hz, $V = 22,1$ l, $m = 215$, $\mu = 1,74$, rezonanční kmitočet pomocné membrány 19,1 Hz

94 dB se sníží jednak vlivem kmitočtového průběhu o 1,5 dB, a jednak, bere-li se v úvahu pokles hladiny přirozeného signálu o 0,9 dB, na 91,6 dB, čili na $p = 0,76$ Pa. Protože pro 50 Hz je $q = \frac{50}{33,3} = 1,5$, bude podle rovnice (7.46) výchylka

$$y = \frac{240.0,76}{0,133^2.33,3^2.1,5^2} = 2,7 \text{ mm},$$

což je přijatelné. Při 40 Hz bude výchylka membrány při výsledném akustickém tlaku sníženém vlivem poklesu kmitočtové charakteristiky (o 7 dB) a poklesu vlivem spektra přirozeného signálu (viz obr. 7.14) menší o dalších 2,1 dB – tedy celkem o 9,1 dB –

$$y = \frac{240-0,35}{0,133^2.33,3^2.1,2^3} \doteq 2,5 \text{ mm}.$$

Ze srovnání s kmitočtovým průběhem vyzařovací jednotky s klasickou bass-reflexovou ozvučnicí se stejným dolním mezním kmitočtem a o stejném objemu (viz obr. 7.15) je patrné, že se, pokud jde o přenosové vlastnosti, obě jednotky téměř neliší. Výrobně je ovšem jednotka s pomocnou membránou náročnější.

8. Reproduktorové soustavy

Protože s ohledem na dosažitelné vlastnosti známých elektroakustických měničů nelze zkonstruovat jednotku s jediným měničem, která by měla vyhovující přenosové vlastnosti (dostatečnou citlivost a vyzářený akustický výkon, vyhovující kmitočtovou charakteristiku a směrové vlastnosti, malé nelineární a intermodulační zkreslení), řeší se jednotky určené pro kvalitní reprodukci akustického signálu jako několikapásmové. Jsou v nich použity dva, tři, v krajním případě i čtyři elektroakustické měniče, jejichž přenášená kmitočtová pásma na sebe navazují.

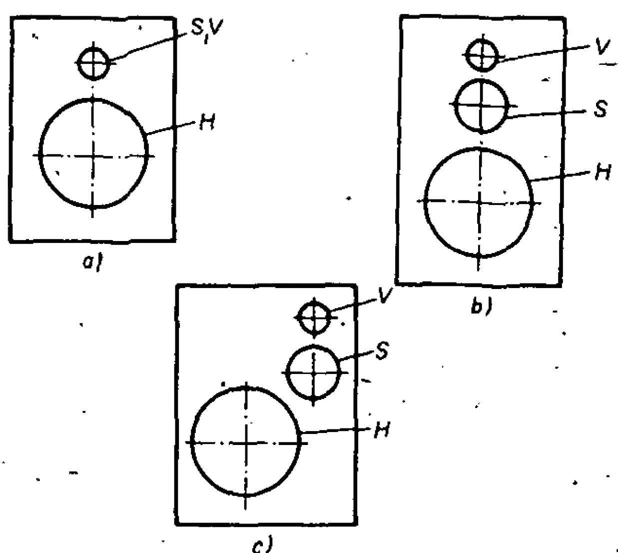
Dílčí elektroakustické měniče musí být řešeny a rozmístěny tak, aby výsledná kmitočtová charakteristika soustavy byla vyrovnaná a to nejen v ose, ale i ve směrech mimo osu soustavy a to při minimálním možném nelineárním i zákmitovém zkreslení. Aby toho bylo dosaženo je nutné, aby jednotlivé zářiče, jejichž kmitočtová pásma na sebe navazují, byly umístěny co nejblíže u sebe. Pokud se použijí přímovyzařující reproduktory je vhodné, aby při dělicím kmitočtu f_d (kmitočtu, při němž oba zářiče vyzařují přibližně stejný akustický výkon), byl obvod membrány zářiče o větším průměru membrány nejvýše roven délce vlny při tomto dělicím kmitočtu.

Tuto podmínku lze vyjádřit vztahem

$$f_d \leq \frac{c_0}{\pi D}. \quad (8.1).$$

Vzdálenost středů membrán obou zářičů má být, jak již bylo řečeno, minimální.

Obvyklé uspořádání jednotlivých reproduktorů soustavy je na obr. 8.1. Optimální je směrová charakteristika takto uspořádaných soustav ve vodorovné rovině, kdy odpovídá v podstatě směrové charakteristice jednotlivých zářičů. Ve vertikální rovině vznikají, podle vzdálenosti sousedních zářičů, na směrové charakteristice při určité odchylce od osy soustavy minima a to obvykle v oblasti dělicího kmitočtu. Tato minima jsou méně



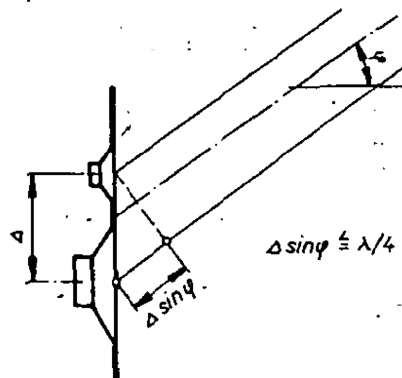
Obr. 8.1. Účelné uspořádání zářičů několikapásmových reproduktorových soustav (zářiče mohou být umístěny i mírně excentricky); a) dvoupásmová soustava, b, c) třípásmové soustavy (H hlubokotónový, S středotónový a V vysokotónový reproduktor)

význačná při malé vzdálenosti dílčích zářičů.

Při aplikaci reproduktorů, u nichž je akustický tlak v blízkém poli ve fázi s jejich svorkovým napětím (což platí obvykle v oblasti nižších kmitočtů), nemá být vzdálenost Δ středů membrán současně se uplatňujících reproduktorů větší než

$$\Delta \leqq \frac{c_0}{4f_d \sin\varphi} = \frac{\lambda}{4 \sin\varphi} \qquad (8.2),$$

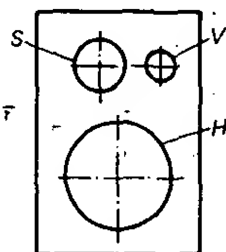
kde c_0 je rychlost šíření zvuku, f_d dělicí kmitočet a φ úhel mezi osou zářiče a směrem, v němž ještě požadujeme vyrovnaný kmitočtový průběh (viz obr. 8.2). Tuto podmínku lze obvykle snadno splnit u hlubokotónové a středotónové jednotky, obtížněji u středotónové a vysokotónové.



Obr. 8.2. Určení maximální vzdálenosti hlubokotónového (středotónového) a vysokotónového reproduktoru

Podobné zásady platí i v případě, kdy jsou aplikovány nepřímovyzařující reproduktory.

Uspořádání vyzařovacích jednotek podle obr. 8.3, které se také někdy používá, je nevýhodné proto, že směrová charakteristika v horizontální rovině je vyhovující při menších odchylkách od osy než v rovině vertikální.



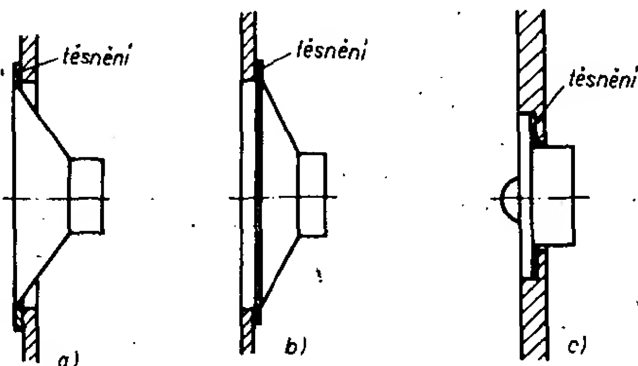
Obr. 8.3. Uspořádání středotónového a vysokotónového reproduktoru vedle sebe (méně výhodné s ohledem na směrové vlastnosti ve vodorovné rovině)

Reproduktorové soustavy se řeší buď s výhybkami na „výkonové straně" budicího signálu (takzvaná pasívní výhybka), kdy je napájena celá soustava z výstupu jediného výkonového zesilovače, nebo, u takzvaných aktivních soustav, na vstupní straně dílčích výkonových zesilovačů, napájejících jednotlivé zářiče. Vždy je nutno dbát na to, aby i v oblasti dělicích kmitočtů byl kmitočtový průběh soustavy pokud možno kmitočtově nezávislý.

Skříně reproduktorových soustav, které se uplatňují jako ozvučnice, musí mít tuhé stěny, které nesmí při činnosti reproduktorů spolukmitat tak, aby se jimi vyzářená akustická energie významněji podílela na energii vyzářené reproduktorem. Kvalita reprodukce není rušivě ovlivněna, má-li hladina signálu vyzářeného kmitajícími stěnami ozvučnice v místě posluchače relativní úroveň alespoň o 12 dB nižší než hladina signálu vyzářeného reproduktorem, případně jinou částí ozvučnice (například otvorem hrdla bass-reflexové ozvučnice, či pomocnou membránou).

Reproduktory musí být montovány tak, aby přední strana jejich membrány pokud možno lícovala s plochou stěny ozvučnice, v níž jsou umístěny. To se týká zejména reproduktorů středotónových a vysokotónových. U hlubokotónových reproduktorů musí být zmíněná zásada dodržena u dvoupásmových soustav.

Správná montáž reproduktoru na přední stěnu ozvučnice je znázorněna na obr. 8.4. Tato montáž má i tu přednost, že se snadněji prakticky realizuje.



Obr. 8.4. Uspořádání reproduktorů na přední stěně ozvučnice; a) hlubokotónový a středotónový reproduktor, b) hlubokotónový reproduktor, c) vysokotónový reproduktor

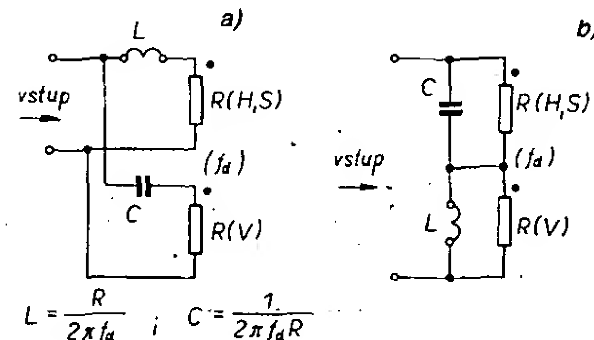
Ozvučnice zásadně musí být dokonale utěsněny. To se ovšem týká i samotného reproduktoru (proto se u moderních hlubokotónových reproduktorů zakrývá středový otvor membrány s kmitací cívkou kopulkou). Dokonalé těsnění je zejména důležité u bass-reflexových ozvučnic.

8.1 Výhybky reproduktorových soustav napájených z jediného výkonového zesilovače

Výstupní signál výkonového zesilovače se u vícepásmových vyzařovacích soustav přivádí na jednotlivé jejich jednotky přes pasivní filtry, propouštějící pro příslušnou jednotku signály v kmitočtovém pásmu, které je schopna optimálně zpracovat. V běžné praxi se používají výhybky prvého, druhého a výjimečně i třetího řádu, vzácně řádů vyšších. Řád výhybky udává kmitočtový průběh výhybky v oblasti, kdy se uplatňuje její útlum. (Výhybka 1. řádu způsobuje pokles 6 dB/okt, výhybka 2. řádu 12 dB/okt a výhybka 3. řádu 18 dB//okt.)

8.1.1 Výhybky prvního řádu

Výhybky prvního řádu jsou výhodné proto, že se u nich neuplatňují nežádoucí zákmitové jevy. Lze je však použít pouze ve spojení s kvalitními reproduktory o velmi vyrovnané kmitočtové charakteristice. Tento druh výhybky je na obr. 8.5 pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu a na obr. 8.6 pro soustavu třípásmovou. Výhybky podle a) i b) mají stejné vlastnosti.

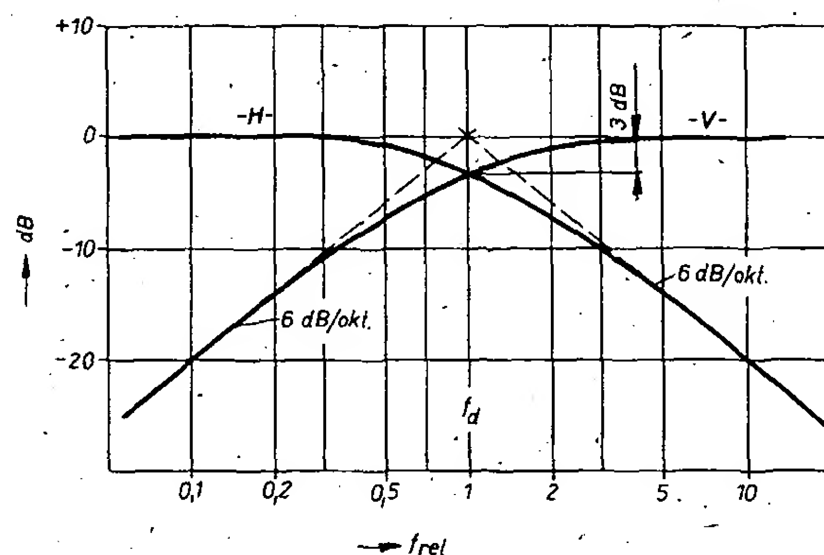


Obr. 8.5. Uspořádání výhybek prvního řádu pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu

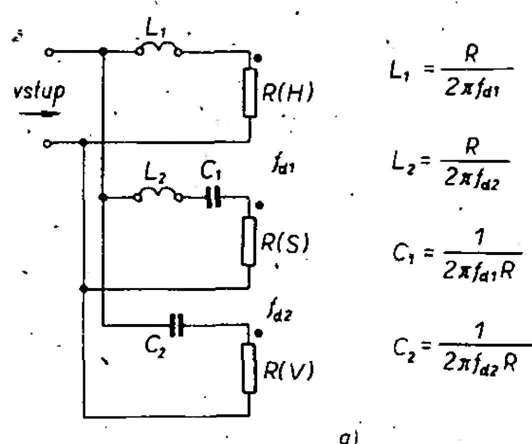
Je-li jmenovitá impedance reproduktorů R, mají pro dělicí kmitočty f_{d1} a f_{d2} prvky výhybky hodnoty uvedené v tab. 5. Kmitočtové průběhy jednotlivých částí výhybek jsou na obr. 8.5a a obr. 8.6b.

Tab. 5.

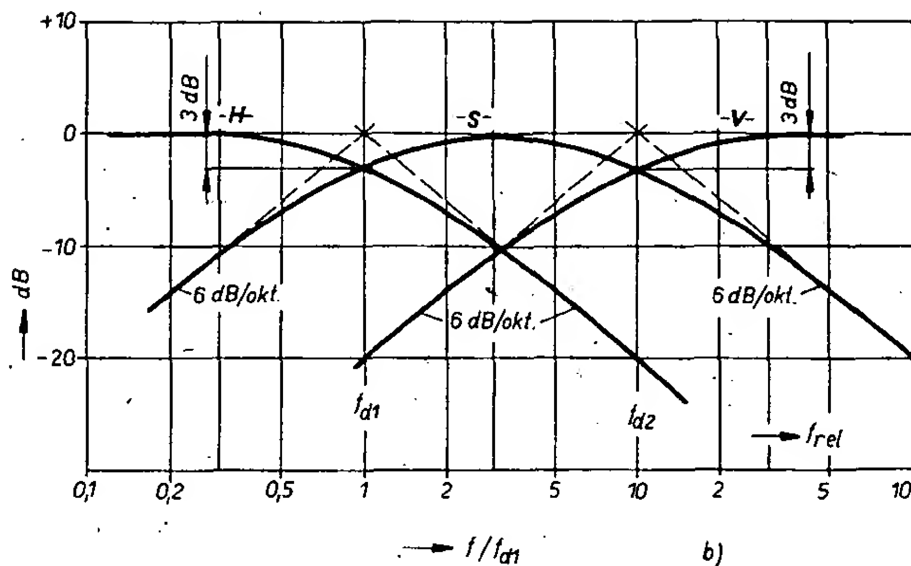
Dělicí kmitočet	L	C	Poznámka
f_d	$\frac{R}{2\pi f_d}$	$\frac{1}{2\pi f_d R}$	dvoupásmová soustava
f_{d1}	$\frac{R}{2\pi f_{d1}}$	$\frac{1}{2\pi f_{d1} R}$	třípásmová soustava
f_{d2}	$\frac{R}{2\pi f_{d2}}$	$\frac{1}{2\pi f_{d2} R}$	



Obr. 8.5a. Kmitočtové průběhy napětí na svorkách hlubokotónového a vysokotónového reproduktoru, je-li jejich vstupní impedance čistě činná



Obr. 8.6. Uspořádání výhybek prvního řádu pro třípásmovou reproduktorovou soustavu (a) a jejich kmitočtové průběhy (platné pro čistě činnou zátěž jejich výstupních svorek)



Pro správnou funkci výhybek tohoto typu je nezbytné, aby v oblasti dělicího kmitočtu byla vstupní impedance reproduktorů čistě reálná. Pokud tato základní podmínka není splněna, je funkce výhybek nevyhovující. Na tuto skutečnost nutné brát zřetel. Pokud jsou použity běžné reproduktory, u nichž se s rostoucím kmitočtem vlivem indukčnosti kmitací cívky zvětšuje i jejich vstupní impedance, je nezbytné opatřit je pomocným paralelním obvodem ze sériové kombinace odporu a kondenzátoru, který upraví vstupní impedanci reproduktoru tak, že je kmitočtově téměř nezávislá (viz kapitola 5). Tato úprava se týká hlubokotónového a středotónového reproduktoru v oblasti dělicího kmitočtu.

S ohledem na správnou funkci výhybky je také nutné, aby rezonanční kmitočet středotónového a vysokotónového reproduktoru byl vždy dostatečně „hluboko" pod dělicím kmitočtem (více než 2 oktávy!)

Významnou vlastností výhybky prvního řádu je skutečnost, že za ideálních podmínek je vstupní impedance stejně jako výsledná kmitočtová charakteristika, měřená na akustické straně, kmitočtově nezávislá. Polarita všech použitých měničů musí být stejná.

Z uvedeného je patrné, že s ohledem na mimořádně striktní požadavek konstantní zatěžovací impedance použitých filtrů a na nutnost aplikovat reproduktory o vyrovnaném kmitočtovém průběhu v okolí dělicích kmitočtů je použitelnost těchto jednoduchých výhybek omezená.

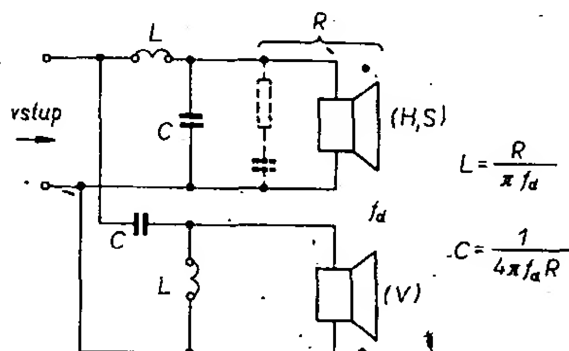
8.1.2 Výhybky druhého řádu

V praxi se nejčastěji používají výhybky druhého řádu, které jsou schematicky znázorněny na obr. 8.7 a obr. 8.8 (výhybka pro dvoupásmovou a třípásmovou reproduktorovou soustavu).

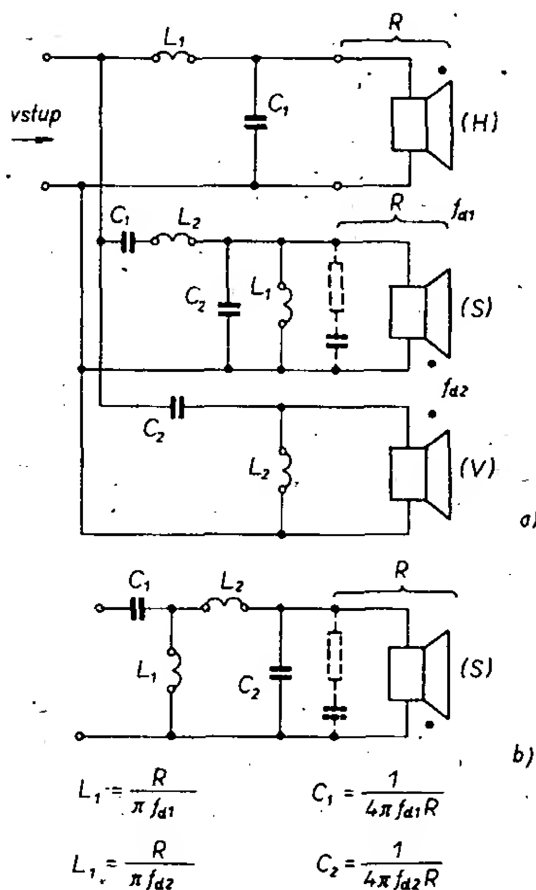
Indukčnosti cívek a kapacity kondenzátorů pro dané dělicí kmitočty jsou uvedeny v tab. 6.

Je-li dělicí kmitočet f_{d1} v oblasti, v níž je impedance hlubokotónového reproduktoru jen málo závislá na kmitočtu, není nutné aplikovat u něj obvod pro korigování průběhu impedance. To platí obvykle pro hlubokotónové reproduktory, je-li dělicí kmitočet nižší než 500 až 600 Hz.

U středotónového reproduktoru bývá však prvek pro vyrovnání vstupní impedance vždy zcela nezbytný. Totéž platí pro hlubokotónový a středotónový reproduktor dvoupásmové reproduktorové soustavy podle obr. 8.7.



Obr. 8.7. Výhybky druhého řádu pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu



Obr. 8.8. Výhybky druhého řádu pro třípásmovou reproduktorovou soustavu (a) a s modifikovaným zapojením (b) pro středotónový reproduktor

Tab. 6.

Dělicí kmitočet	L_1	L_2	C_1	C_2	Poznámka
f_d	$\frac{R}{\pi f_d}$		$\frac{1}{4\pi f_d R}$	–	dvoupásmová soustava
f_{d1}	$\frac{R}{\pi f_{d1}}$		$\frac{1}{4\pi f_{d1} R}$		třípásmová soustava
f_{d2}		$\frac{R}{\pi f_{d2}}$		$\frac{1}{4\pi f_{d2}}$	

Jak již bylo řečeno, důležitou podmínkou pro správnou činnost klasické výhybky je požadavek, že její výstupní svorky musí být zatíženy konstantní a to pokud možno čistě reálnou impedancí. Pokud tato podmínka není splněna, liší se skutečný kmitočtový průběh výhybky od původně předpokládaného (teoretického) velmi značně. Velmi často je nutné volit dělicí kmitočty s ohledem na kmitočtový průběh dílčích reproduktorů. Tak u hlubokotónového reproduktoru (pokud se nepoužije obvod pro vyrovnání vstupní impedance) je třeba volit dělicí kmitočet v oblasti, v níž se vstupní impedance reproduktoru nezvětšuje o více než 10 až 20 % jmenovité velikosti. Totéž platí ovšem i pro středotónový a vysokotónový reproduktor a to také v oblasti dolního mezního kmitočtu, který musí být volen alespoň o 1 oktávu výše, než je jeho rezonanční kmitočet. V oblasti horního dělicího kmitočtu středotónového reproduktoru díky vyrovnání jeho vstupní impedance žádné problémy nevznikají.

Při připojení reproduktorů na výstupní svorky výhybek je nutno mít na zřeteli, že v oblasti dělicího kmitočtu je fáze výstupních napětí opačná, takže je třeba navzájem reproduktory přepólovat (středotónový reproduktor musí mít opačnou polaritu než reproduktor hlubokotónový). Totéž platí i pro horní dělicí kmitočet f_{d2}. V této oblasti se však obvykle vzhledem k velké indukční složce vstupní impedance středotónového reproduktoru (anebo hlubokotónového reproduktoru ve dvoupásmové soustavě) natáčí fáze akustického tlaku před membránou reproduktoru při současném natočení fáze vysokotónového reproduktoru v opačném směru, takže často přepólování není nutné. To se týká například soustavy se středotónovým reproduktorem ARZ 4604/8 a vysokotónovým ARV 3604/8. V každém případě je nezbytné zkontrolovat správnost fázování a to kontrolou kmitočtové charakteristiky, která v oblasti dělicího kmitočtu (i mimo něj) nesmí mít nežádoucí zvlnění, případně ostré minimum.

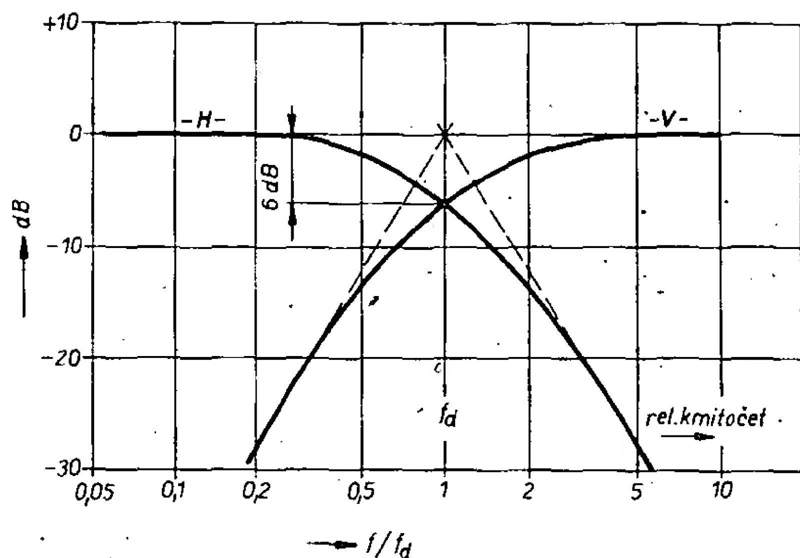
Kmitočtové průběhy napětí měřených na jednotlivých reproduktorech jsou na obr. 8.9. a 8.10.

Vstupní impedance celé soustavy je v oblasti dělicích kmitočtů zhruba až dvojnásobná oproti jmenovité velikosti, což však při použití zesilovače o malé výstupní impedanci (která je dnes obvyklá) nevadí.

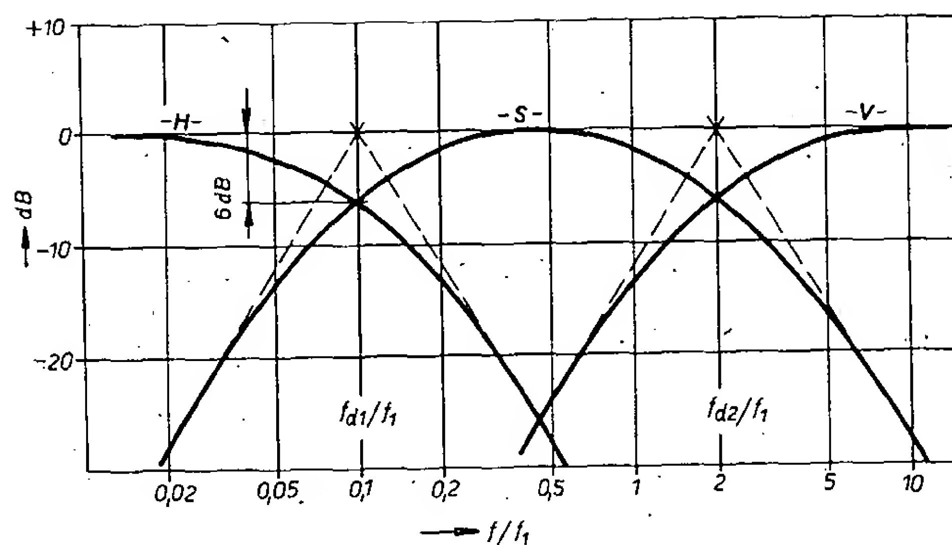
Vše, co zde bylo řečeno, platí však pouze při dostatečně malém odporu použitých tlumivek (činný odpor tlumivky nemá být pokud možno větší než 1/10 jmenovité impedance použitých reproduktorů).

Předností výhybek druhého řádu je jejich, ve většině případů vyhovující průběh útlumu, poměrná jednoduchost a vyhovující průběh vstupní impedance soustavy. Nevýhodou ovšem je to, že jejich správná činnost vyžaduje zatížit jejich výstupní svorky reálnou impedancí správné velikosti. Jako příklad je uveden výpočet klasické výhybky druhého řádu pro reproduktory ARN 567 a ARV 081.

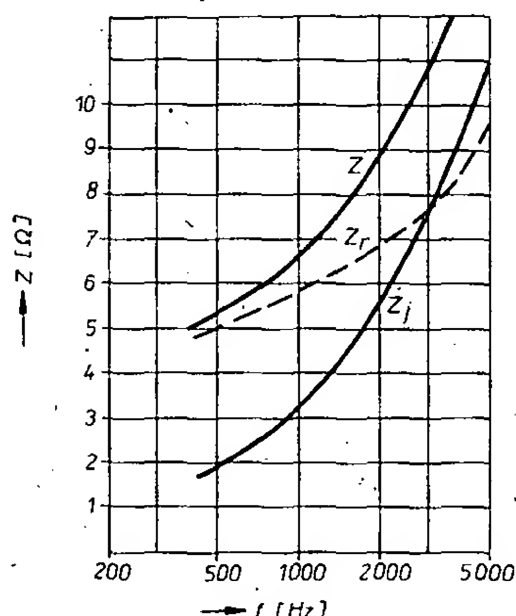
Vychází se z grafu na obr. 8.11, z něhož je patrný průběh impedance hlubokotónového reproduktoru a průběh její reálné (Z_{re}) a imaginární (Z_i) složky. Dělicí kmitočet f_d nechť je 2,5 kHz.



Obr. 8.9. *Kmitočtový průběh výstupního napětí klasické výhybky druhého řádu podle obr. 8.7*



Obr. 8.10. *Kmitočtový průběh výstupního napětí klasické výhybky druhého řádu pro třípásmovou soustavu podle obr. 8.8*



Obr. 8.11. *Průběh vstupní impedance hlubokotónového reproduktoru ARN 567 v oblasti dělicího kmitočtu dvoupásmové reproduktorové soustavy ($Z = Z_r + jZ_j$)*

Prvek pro vyrovnání vstupní impedance se skládá z rezistoru 5 Ω a kondenzátoru 30 až 33 μF (lze použít elektrolytický kondenzátor pro napětí 25 V); L a C se stanoví ze základních rovnic

$$L = \frac{R_v}{\pi f_d} = \frac{4}{\pi . 2500} = 0{,}51 \text{ mH},$$

$$C = \frac{1}{4\pi f_d R_v} = \frac{1}{4\pi . 2500 . 4} \doteq 8 \text{ μF}.$$

Kmitočtové průběhy svorkových napětí obou reproduktorů a schéma výhybky jsou na obr. 8.12.

8.1.3 Modifikovaná výhybka druhého řádu

U jednoduchých a levnějších dvoupásmových reproduktorových soustav se v některých případech používají výhybky řešené tak, aby uspokojivě pracovaly i ve spojení s reproduktorem bez vykompenzované vstupní impedance. Zapojení, které je krajně jednoduché, je na obr. 8.13. Podobné uspořádání lze ovšem aplikovat i u vícepásmových soustav.

U tohoto uspořádání mají obě cívky různé indukčnosti a podobně i kondenzátory různé kapacity. Exaktní způsob pro výpočet potřebných součástí výhybky neexistuje – při řešení je nutno postupovat pouze experimentálně.

Vychází se z průběhu impedance reproduktoru použitého ve výhybce, u něhož musí být znám průběh reálné i imaginární složky jeho vstupní impedance v okolí zvoleného dělicího kmitočtu f_d (obr. 8.11). Jde o průběh vstupní impedance Z tohoto reproduktoru a jeho reálné Z_{re} i imaginární Z_i složky.

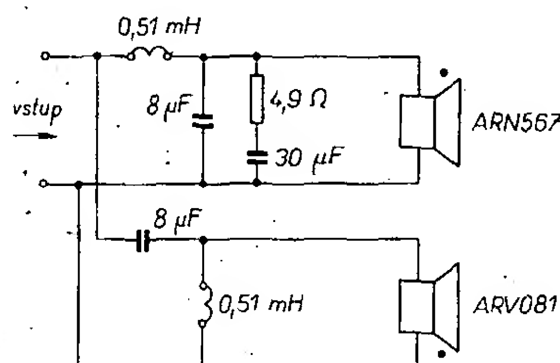
Při návrhu výhybky se postupuje tak, že se pro zvolený dělicí kmitočet f_d stanoví absolutní hodnota impedance reproduktoru Z_d a reálná složka této impedance $Z_{re,d}$ a určí se podíl dělicího kmitočtu f_d a rezonančního kmitočtu f_r obvodu L_1, C_1

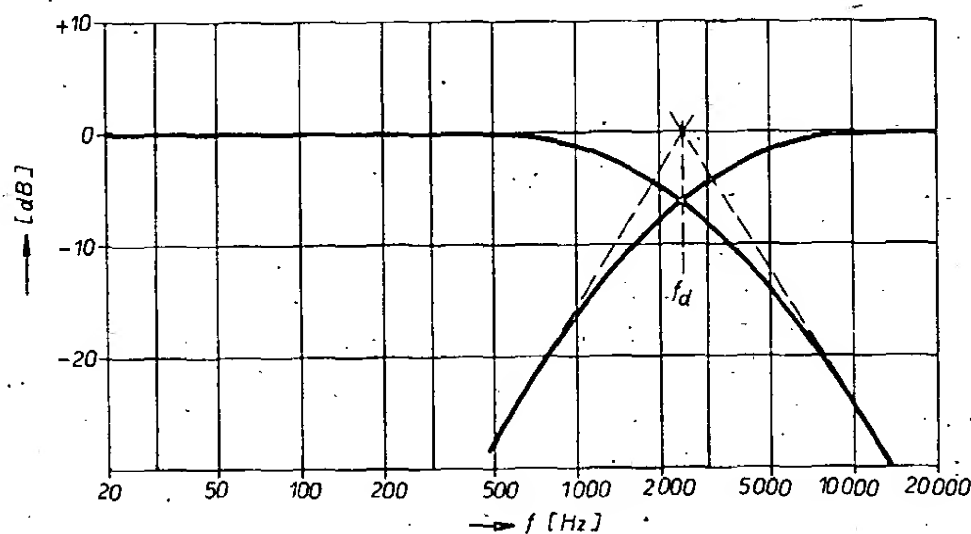
$$\frac{f_d}{f_r} = \varkappa_d = \sqrt{1 + \sqrt{2}\frac{Z_d}{Z_{re,d}}} \qquad (8.3).$$

Indukčnost L_1 se určí ze vztahu

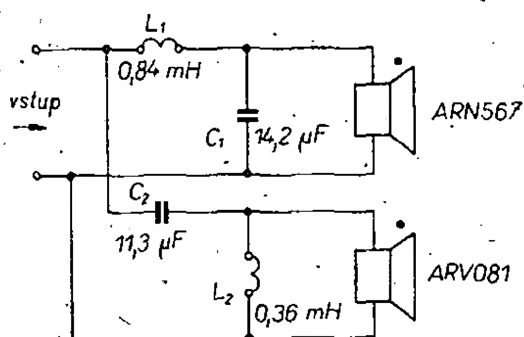
$$L_1 = Z_{id}\frac{\varkappa_d^2 - 1}{2\pi f_d} \quad [\text{H}; \Omega, \text{Hz}] \qquad (8.4)$$

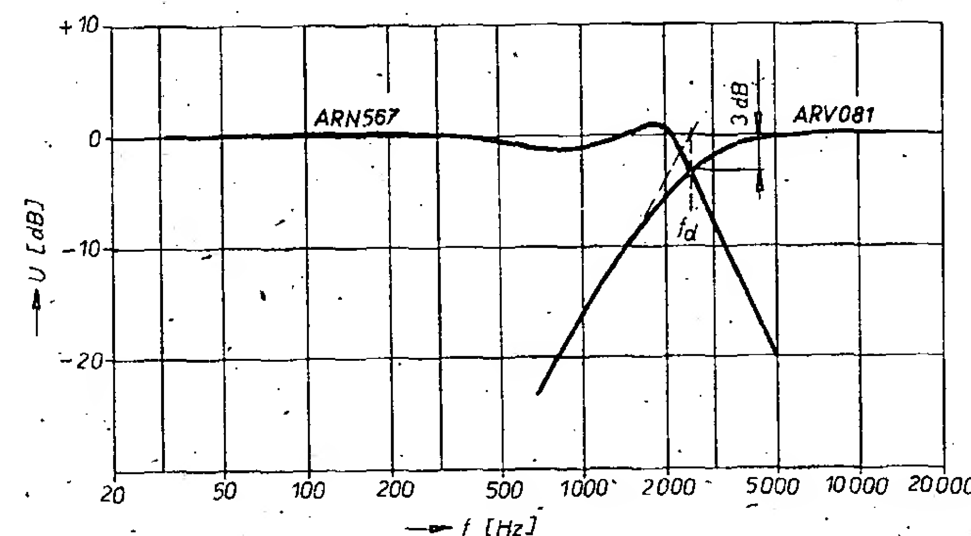
a kapacita C_1





Obr. 8.12. *Zapojení klasické výhybky druhého řádu pro reproduktor ARN 567 a ARV 081 a průběh napětí na svorkách reproduktorů*





Obr. 8.13. *Zapojení modifikované výhybky druhého řádu pro reproduktory ARN 567 a ARV 081 a kmitočtové průběhy jejich svorkových napětí*

$$C_1 = \frac{10^6}{(2\pi f_d \varkappa_d)^2 L_1} \quad [\mu F; Hz, H] \quad (8.5).$$

Rezonanční kmitočet článku L_1C_1 je dán přitom výrazem

$$f_r = \frac{f_d}{\varkappa_d} \quad (8.6).$$

Popsaný postup lze aplikovat, je-li

$$0,85 \leqq \frac{\omega_r L_1}{Z_r} \leqq 1,2 \quad (8.7),$$

(Z_r je impedance reproduktoru při kmitočtu f_r).

Indukčnost L_2 a kapacita C_2 pro vysokotónový reproduktor se určí ze vztahů

$$L_2 = \frac{Z_v\sqrt{2}}{2\pi f_d} \quad [H; \Omega, Hz] \quad (8.8),$$

$$C_2 = \frac{10^6}{2\pi f_d \sqrt{2} Z_v} \quad [\mu F; Hz, \Omega] \quad (8.9),$$

kde Z_v je jmenovitá impedance vysokotónového reproduktoru.

Zmíněný druh výhybky není příliš výhodný, protože kapacita kondenzátoru C_1 vychází příliš veliká (což je na závadu při použití svitkových kondenzátorů). V každém případě lze doporučit aplikaci klasické výhybky i za cenu nutnosti zařadit pomocný korekční obvod *RC* pro vyvažování vstupní impedance hlubokotónového reproduktoru. Pomocný kondenzátor, jehož kapacita není příliš kritická, může být elektrolytický.

Jako příklad je uveden výpočet modifikované výhybky *L, C* pro reproduktory ARN 564 a ARV 081.

Z průběhu impedance hlubokotónového reproduktoru (obr. 8.11) zjistíme jeho impedanci při 2,5 kHz (Z_d = 10 Ω) a reálnou složku této impedance ($Z_{re,\,d}$ = 7,25 Ω). Pomocná veličina

$$\varkappa_d = \sqrt{1 + \sqrt{2}\frac{10}{7,25}} = 1,72$$

a rezonanční kmitočet obvodu L_1, C_1

$$f_r = \frac{f_d}{\varkappa_d} = \frac{2500}{1,72} = 1,46 \text{ kHz}.$$

Tlumivka musí mít indukčnost

$$L_1 = 6,8\frac{1,72^2-1}{2\pi.2500} . 10^3 = 0,85 \text{ mH}.$$

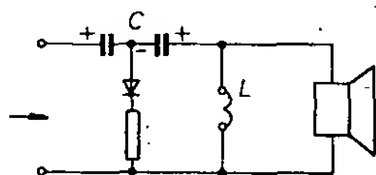
Kapacita

$$C_1 = \frac{10^6}{(2\pi.1460)^2 . 0,85.10^{-3}} = 14 \ \mu F.$$

Zbývající prvky obvodu pro vysokotónový reproduktor budou

$$L_2 = \frac{4.2}{2\pi.2500} = 0,36 \text{ mH}$$

$$C_2 = \frac{10^6}{2\pi.2500.\sqrt{2}.4} = 11,3 \ \mu F.$$



Obr. 8.14. Výhybka pro vysokotónový reproduktor s elektrolytickými kondenzátory opatřená pomocným prvkem pro vytvoření polarizačního napětí

Schéma výhybky je na obr. 8.13. Ze srovnání s klasickou výhybkou o stejném dělicím kmitočtu je patrné, že výhybka modifikovaná vyžaduje kondenzátory větších kapacit, což je, pokud se používají kondenzátory svitkové, nevýhodné.

8.2 Prvky pasívních výhybek pro napájení reproduktorů

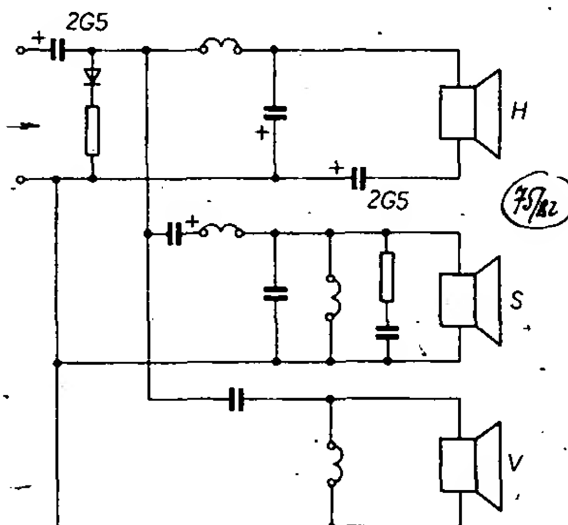
8.2.1 Kondenzátory

Kondenzátory o potřebných kapacitách se obvykle skládají ze svitkových kondenzátorů typu MP. S ohledem na rozměry a provozní podmínky je účelné používat kondenzátory na co nejmenší provozní napětí. V zahraničí se vyrábějí pro daný účel zcela ideální svitkové kondenzátory s metalizovaným dielektrikem z extrémně tenkých polymerových fólií, obvykle mylarových.

Bez obtíží lze však použít i kondenzátory elektrolytické, nejlépe bipolární. Pokud takové nejsou k dispozici, lze aplikovat dva běžné elektrolytické kondenzátory stejného typu o stejné kapacitě, které jsou zapojeny v sérii s opačnou polaritou. S ohledem na prodloužení doby jejich života je vhodné přivést do jejich společného bodu polarizační napětí, které lze jednoduše získat usměrněním budicího signálu. Takové jednoduché uspořádání je na obr. 8.14, na němž je jednoduchá výhybka vysokotónového reproduktoru. Diodou usměrněný budicí signál vytváří potřebné stejnosměrné předpětí pro oba kondenzátory. Rezistor zapojený v sérii s usměrňovačem omezuje proud, který vznikne při připojení signálu. Vzhledem k tomu, že nabíjecí proud kondenzátorů je nepatrný, může se použít rezistor pro zatížení okolo 0,1 W.

V krajním případě lze použít i jednoduché elektrolytické kondenzátory, určené na 5 až 10násobné napětí, než které na nich může vytvořit přiváděný signál.

Zvláště příznivá situace nastane, jsou-li v obvodu výhybky sériové elektrolytické kondenzátory, které chrání reproduktorovou soustavu před nežádoucím stejnosměrným proudem, který může proniknout ze zesilovače. Pak postačí pro vytvoření polarizačního napětí pro celou soustavu jediný usměrňovač (obr. 8.15).



Obr. 8.15. Výhybka pro třípásmovou reproduktorovou soustavu s elektrolytickými kondenzátory a obvodem pro vytvoření polarizačního napětí na nich

Použijí-li se pro výhybky elektrolytické kondenzátory, je nutné mít na zřeteli, že jimi při činnosti soustavy protékají poměrně velké proudy. Aby se kondenzátory nezahřívaly, musí být jejich sériový odpor co nejmenší – je ho proto účelné kontrolovat před vestavěním kondenzátoru do výhybky, zejména u soustav o značných příkonech. V takových případech je vhodné s ohledem na zmenšení ztrát v kondenzátoru zařadit několik kondenzátorů paralelně.

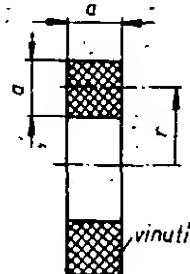
Odpor kondenzátoru lze nejsnáze zkontrolovat tak, že se zjistí jeho impedance v oblasti vysokých kmitočtů (asi při 15 až 20 kHz), kdy je již reaktance kondenzátoru zanedbatelně malá. Sériový odpor elektrolytického kondenzátoru nemá být větší než 0,1 až 0,3 Ω.

8.2.2 Tlumivky

Odpor vinutí tlumivek použitých ve výhybkách má být minimální a nemá překročit 1/10 jmenovité impedance použitého reproduktoru.

Vzduchové cívky, které se často ve výhybkách používají, mají obvykle velmi značné rozměry a hmotnost a to i tehdy, zvolí-li se jejich rozměry tak, aby potřeba mědi byla co nejmenší. Vzhledem k rozměrům a hmotnosti cívky nebývá proto obvykle splněna podmínka o potřebném odporu vinutí cívky. Často bývá jejich odpor až dvojnásobný, což nežádoucím způsobem ovlivňuje kmitočtový průběh výhybek a citlivost soustavy (příliš velký odpor mívá obvykle tlumivka ve výhybce hlubokotónového reproduktoru, což mnohdy ovlivní nepříznivě i kmitočtový průběh celé soustavy právě v kmitočtové oblasti, kde je to nejméně vhodné).

Vzduchová cívka s minimální hmotností má mít rozměry podle obr. 8.16. Délka hrany řezu cívkou má být a = 0,68r, kde r je střední poloměr cívky.



Obr. 8.16. Rozměry úsporné vzduchové tlumivky

Indukčnost takové cívky o n závitech je

$$L = 1,68.10^{-5} r n^2 \quad [\text{mH; cm}] \quad (8.10)$$

a průměr d použitého vodiče

$$d = \frac{0,68r}{\sqrt{nk}} \quad [\text{mm; cm, –}] \quad (8.11),$$

kde k je plnění cívky o průřezu S_c:

$$k = \frac{S_c}{d^2 n} \quad (8.12);$$

k pro lakované vodiče o průměru větším než 0,5 mm je 1,3 až 1,4.

Při návrhu vzduchové tlumivky se vychází z požadované indukčnosti L [mH] a zvoleného odporu vinutí R [Ω].

Střední poloměr r takové cívky vinuté měděným lakovaným vodičem je

$$r = 1,322\sqrt{\frac{L}{R}k} \quad [\text{cm; mH, } \Omega] \quad (8.13),$$

průměr vodiče d

$$d = 0,435\sqrt[4]{r^5/(k^2L)} \quad [\text{mm; cm, mH}] \quad (8.13),$$

a počet závitů n

$$n = 244\sqrt{L/r} \quad [\text{–; mH, cm}] \quad (8.15).$$

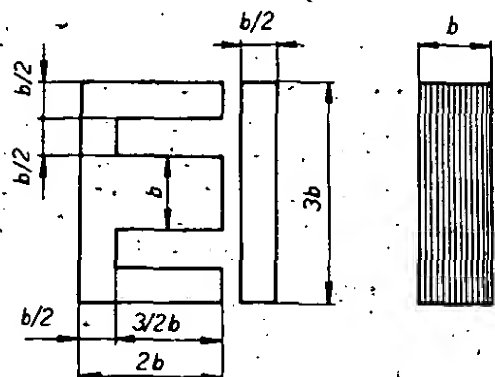
Hmotnost takové cívky pak je

$$m = 47\sqrt{(L/R)^3 k} \quad [\text{g; mH, } \Omega] \quad (8.15).$$

Vzduchové cívky jsou, jak již bylo řečeno, velmi rozměrné a materiálově náročné (i když se místo měděného vodiče použije vodič hliníkový). Mnohem výhodnější jsou cívky s jádry zhotovenými z magneticky vodivého materiálu.

Jádra ovšem nutno dimenzovat tak, aby se při provozu nepřesytila a aby indukčnost cívek nebyla závislá na přiloženém střídavém napětí a kmitočtu.

Pokud se použije jádro z transformátorových plechů typu EI o čtvercovém průřezu sloupku a co nejmenší tloušťce ple-



Obr. 8.17. Rozměry jader EI

chů, postupuje se při návrhu cívky takto: ze vzorce

$$b \doteq 3{,}71\sqrt{k\frac{L}{R}} \quad [\mathrm{mm; mH, \Omega}] \qquad (8.17)$$

se určí přibližná šířka b sloupku jádra v mm a zvolí se nejbližší větší šířka podle ČSN (viz například [19]) a tab. 7.

Vzduchová mezera δ má být

$$\delta \doteq b\,.\,0{,}1 \quad [\mathrm{mm}]$$

(vložka vymezující vzduchovou mezeru má ovšem tloušťku poloviční, protože jádro je přerušeno mezerou dvakrát!).

Přibližný počet závitů n je dán vztahem

$$n \doteq 282\sqrt{\frac{L}{b}} \quad [-;\mathrm{mm, mH, mm}] \qquad (8.18)$$

a přibližný průměr vodiče

$$d \doteq \frac{0{,}87b}{\sqrt{nk}} \quad [\mathrm{mm; mm}, -] \qquad (8.19).$$

Hmotnost potřebné mědi bude

$$m = 4{,}19.10^{-2}nd^2b \quad [\mathrm{g}; -, \mathrm{mm, mm, mm}] \qquad (8.20).$$

a skutečný odpor vinutí

$$R \doteq 1{,}3.10^{-4}\frac{nb}{d^2} \quad [\Omega; -, \mathrm{mm, mm}] \qquad (8.21).$$

Závěrem je nutné zkontrolovat sycení jádra, které u výhybky prvního řádu určené pro hlubokotónový reproduktor bude

$$B \doteq 0{,}255\frac{U}{f_dSn} \quad [\mathrm{T; V, Hz, m^2}] \qquad (8.22),$$

kde U je maximální vstupní napětí přivedené na vstup soustavy, f_d dělicí kmitočet hlubokotónové jednotky, S_j plocha jádra [m²] a n počet závitů vinutí, což lze přepsat na vztah

$$B = \frac{U}{f_db^2n}\,.\,2{,}25\,.\,10^5 \quad [\mathrm{T; Hz, mm}, -] \qquad (8.23)$$

U výhybky druhého řádu je sycení

$$B = 0{,}45\frac{U}{f_dSn} \quad [\mathrm{T; V, Hz, m^2}, -] \qquad (8.24)$$

čili

$$B = \frac{U}{f_db^2n}4{,}5\,.\,10^5 \quad [\mathrm{T; Hz, mm}, -] \qquad (8.25).$$

Sycení, které je účelné pro jistotu kontrolovat, nemá být u jádra složeného z transformátorových plechů větší než 0,6 T. Při popsaném dimenzování jádra je velmi pravděpodobné, že tato podmínka bude splněna.

Cívky s jádrem z transformátorových plechů jsou vhodné zejména pro výhybky hlubokotónových reproduktorů třípásmových soustav, kde jsou nezbytné veliké indukčnosti (jednotky až desítky mH). Pro ostatní druhy výhybek jsou podstatně výhodnější cívky s feritovými jádry, o nichž bude zmínka dále. Pro amatérské účely, kdy se jedná o zhotovení jen několika tlumivek a úspora mědi nehraje takovou roli a cívky mají indukčnost menší 1 mH, vyhoví ovšem cívky vzduchové.

Tab. 7. Rozměry transformátorových plechů EI vhodných pro tlumivky výhybek

b [mm]	10	12	16	20	25	32	40
S_j [cm²]	1	1,44	2,56	4	6,25	10	16

Při hromadné výrobě reproduktorových soustav, při níž má úspora mědi rozhodující význam, jsou cívky s feritovými jádry mimořádně účelné. Jejich aplikace přináší pronikavou úsporu mědi při významném zmenšení hmotnosti celé soustavy. Jedná se o cívky výhybek pro středotónové i vysokotónové reproduktory.

U výhybky prvního řádu určené pro středotónový reproduktor, jejíž horní mezní kmitočet je f_{d2} (na dolním mezním kmitočtu f_{d1} v daném případě nezáleží) (obr. 8.5), musí mít vinutí cívky s feritovým jádrem o průřezu S_j počet závitů n daný výrazem

$$n \geqq 2{,}25\frac{U}{f_{d2}SB} \quad [-;\mathrm{V, kHz, cm^2, T}] \qquad (8.26),$$

a B nemá být větší než 0,28 T, což po dosazení lze přepsat na

$$n \geqq 8\frac{U}{f_{d2}S} \quad [-;\mathrm{V, kHz, cm^2}] \qquad (8.27).$$

U výhybky druhého řádu pro středotónový reproduktor (obr. 8.7; 8.8) je počet závitů „podélné" cívky (v sérii s reproduktorem)

$$n \geqq 0{,}45\frac{U}{f_{d2}S_jB} \quad [-;\mathrm{V, Hz, m^2, T}] \qquad (8.28)$$

nebo pro B = 0,28 T

$$n \geqq 16\frac{U}{f_{d2}S_j} \quad [-;\mathrm{V, kHz, cm^2}] \qquad (8.29).$$

U výhybky druhého řádu určené pro potlačení signálů o nižších kmitočtech než f_d (tedy výhybky pro středotónový nebo vysokotónový reproduktor) musí mít použitá cívka, zapojená paralelně k reproduktoru, má-li být sycení v jejím jádře B, počet závitů

$$n = 0{,}11\frac{U}{f_dS_jB} \quad [-;\mathrm{V, Hz, m^2, T}] \qquad (8.30)$$

nebo při ploše jádra S_j v cm² a f_d v kHz a při B = 0,28 T

$$n = 3{,}9\frac{U}{f_dS_j} \quad [-;\mathrm{V, kHz, cm^2}] \qquad (8.31).$$

Při návrhu indukčnosti cívky pro modifikovanou výhybku druhého řádu podle článku 8.1.3 se vychází ze vztahů (8.28) a (8.29), v nichž se dosadí za dělicí kmitočet f_d rezonanční kmitočet indukčnosti L a kondenzátoru C ($f_{rez} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$.

Cívku pro vysokotónový reproduktor lze dimenzovat podle vztahu (8.30), případně (8.31).

Při stanovení rozměrů jádra a vinutí lze doporučit tento postup:

Podle prospektu PRAMET Šumperk (tab. 8) se zvolí vhodný typ jádra o ploše S_j a vypočte se ze vztahu (8.28) popř. (8.30) minimální možný počet závitů (pro napětí $U = \sqrt{NZ_n}$, kde N je příkon soustavy a Z_n jmenovitá impedance daného reproduktoru).

Tab. 8. Rozměry feritových hrníčkových jader podle obr. 8.18, vhodných pro tlumivky výhybek

a	c	e	S_j [cm²]	A [nH]
[mm]				
7,6	18	11	0,43	100 160 200
11,5	26	16	0,94	100 160 250 400
13,5	30	19	1,36	250 400 630

Pro známou indukčnost L a vypočtený počet závitů n se určí potřebná konstanta jádra A

$$A = \frac{L}{n^2}\,.\,10^6 \quad [\mathrm{nH; mH}, -] \qquad (8.32),$$

které odpovídá příslušná vzduchová mezera. Pokud není k dispozici jádro o dané konstantě, zvolí se typ s menší konstantou a počet závitů se zvětší, aby odpovídal vztahu

$$n_1 = 10^3\sqrt{L/A} \quad [-;\mathrm{mH, nH}] \qquad (8.33)$$

(pak bude maximální sycení poněkud menší, což je ovšem příznivé).

Závěrem se z plochy cívky S_c [mm²] určí průměr vodiče

$$d = \sqrt{\frac{S_c}{n\,(1{,}3 \text{ až } 1{,}5)}} \quad [\mathrm{mm; mm^2}, -] \qquad (8.34)$$

a jeho odpor

$$R = 1{,}7\,.\,10^{-2}\frac{l_z.10^{-2}n}{(\pi/4)d^2} \quad [\Omega;\mathrm{cm, mm^2}] \qquad (8.35).$$

Protože u cívek pro feritová jádra je střední délka závitu

$$l_z = 4{,}55a \quad [\mathrm{mm}],$$

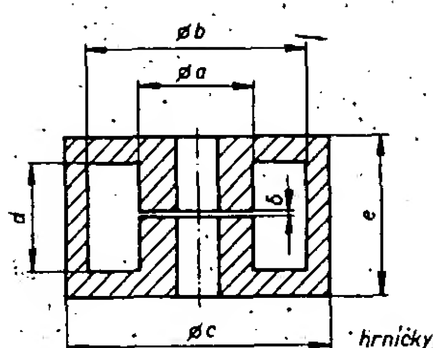
kde a je průměr středního jádra, je přibližný odpor vinutí dán vztahem

$$R = \frac{an^2}{S_c}(1{,}3 \text{ až } 1{,}5)\,.\,10^{-4} \quad [\Omega;\mathrm{mm, mm^2}] \qquad (8.36).$$

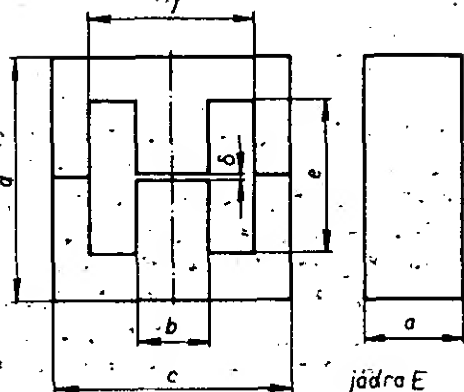
Pro úplnost je nutno mít na zřeteli, že množství mědi, potřebné k realizaci cívky o zvolené indukčnosti, je obvykle 1/50 až 1/100 množství mědi nutné ke zhotovení vzduchové cívky stejných vlastností. Cívka s jádrem má ovšem i podstatně menší objem a celkovou hmotnost.

Jako příklad uvedeme výpočet tlumivky o indukčnosti 5,1 mH pro výhybku středotónového reproduktoru o dolním mezním kmitočtu f_d = 599 Hz, jmenovité impedanci 8 Ω a požadovaném příkonu 20 W.

Napětí na vstupu reproduktorové soustavy



a [mm]	c [mm]	e [mm]
6	14,3	8,5
7,6	18,4	10,7
9,4	22	13,6
11,5	26	16,3
13,5	30,5	19
16	36,2	22
17,7	43,1	29,9



a [mm]	b [mm]	c [mm]
4,8	5	20
5,8	6	25
7,8	8	32
12	8	32
15	12	42
21	17	55,2
27,4	20	65,4

Obr. 8.18. Rozměry feritových jader PRAMET vhodných pro výhybky (hrníčky a jádra „E“)

$$U = \sqrt{20 \times 8} = 12{,}6\ \mathrm{V}.$$

Pro realizaci tlumivky zvolíme feritové jádro o vnějším průměru 26 mm, výšce 16 mm a hmotnosti 21 g. Z plochy jádra $S_j = 0{,}936\ \mathrm{cm}^2$ si stanovíme počet závitů (vztah 8.31)

$$n = 3{,}9 \frac{12{,}6}{0{,}5 \cdot 0{,}935} = 105.$$

Jádro by mělo mít konstantu

$$A = \frac{5{,}1}{105^2} 10^6 = 462\ \mathrm{nH}.$$

Protože je k dispozici jádro o konstantě $A = 450$, musíme zvětšit počet závitů na

$$n = 10^3 \sqrt{\frac{L}{A}} = 10^3 \sqrt{\frac{5{,}1}{450}} = 106.$$

Průměr vodiče při užitečné ploše cívky $S_c = 25\ \mathrm{mm}^2$ bude

$$d = \sqrt{\frac{25}{1{,}3 \cdot 106}} = 0{,}43\ \mathrm{mm}.$$

Volíme vodič o Ø 0,40 mm.

Odpor vinutí bude (při $a = 11{,}5$ mm jádra)

$$R = \frac{11{,}5 \cdot 106^2}{25} 1{,}3 \cdot 10^{-4} = 0{,}67\ \Omega,$$

což je odpor pro daný případ přijatelný. Hmotnost mědi bude (délka závitu je 5,1 cm)

$$m = 106 \cdot 5{,}1 \cdot 0{,}04^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 8{,}9 = 6\ \mathrm{g}.$$

Celková hmotnost cívky včetně jádra bude asi 21 + 6 = 27 g.

Hmotnost vinutí vzduchové cívky o stejné indukčnosti a činném odporu by byla, jak je možno se přesvědčit výpočtem, asi 1050 g. Hmotnost mědi by byla 175krát větší!

8.3 Překážky před reproduktory

Překážkami před reproduktory se rozumí buď ochranné mřížky umístěné před jejich ústími nebo textilní i kovové kryty. Tyto překážky musí být řešeny tak, aby škodlivě neovlivňovaly vyzařování reproduktorů.

V současné době se velmi často ponechávají ústí reproduktorů volná, což je z hlediska funkčního nejvýhodnější. Volné a bez jakýchkoli překážek musí být ovšem ústí bass-reflexového otvoru anebo hrdla.

Proti otevřenému ústí reproduktorů lze mít námitky z hlediska estetického, nejsou-li reproduktory příliš pečlivě provedeny.

Pokud je před membránou reproduktoru umístěna perforovaná mřížka, je nutno dbát na to, aby jednak její tloušťka nepřekročila 4 mm a jednak aby poměr volné plochy otvorů a plochy zakryté neprodyšným materiálem byl pokud možno 1 : 1. V krajním případě lze připustit, aby volná plocha otvorů tvořila 40 % celkové plochy ústí reproduktoru. Přitom je účelné, aby bylo rozdělení otvorů po celé ploše rovnoměrné a otvory byly co nejmenší. Na 1 cm² plochy mřížky má připadnout minimálně 1,5 otvoru. Při větším počtu otvorů na 1 cm² lze připustit menší volnou plochu otvorů (v procentech). Nutno mít na zřeteli, že vliv perforované mřížky umístěné před reproduktorem se projevuje v oblasti vyšších kmitočtů. Důležité je, aby mřížka byla co nejblíže ústí reproduktoru. Velká dutina mezi mřížkou a membránou způsobuje nežádoucí zvlnění výsledné kmitočtové charakteristiky, opět v oblasti vyšších kmitočtů.

Mřížka musí být tuhá a její vlastní kmity musí být dostatečně tlumeny. Proto je výhodné, je-li zhotovena z materiálu o co největším vnitřním tlumení, tedy z materiálu o dostatečně velké imaginární složce modulu pružnosti. Vlastní kmity mřížky musí být tlumeny natolik, aby při funkci reproduktoru nevznikly pazvuky.

Pokud je před ústím reproduktoru umístěn textil anebo jiný prodyšný materiál, je nutné, aby jeho specifický akustický odpor nepřekročil 50 Pa.s/m. Textil, pokud je volný, musí být dostatečně vzdálen od pevných částí soustavy (např. okrajů reproduktoru), aby při vyzařování akustické energie v oblasti nízkých kmitočtů na tyto části nenarážel.

Je-li prodyšný materiál přitmelen na perforovanou mřížku, má být jeho specifický akustický odpor menší než 50 Pa.s/m a jeho spojení s mřížkou dokonalé, aby při činnosti reproduktoru svým kmitáním nezpůsoboval pazvuky.

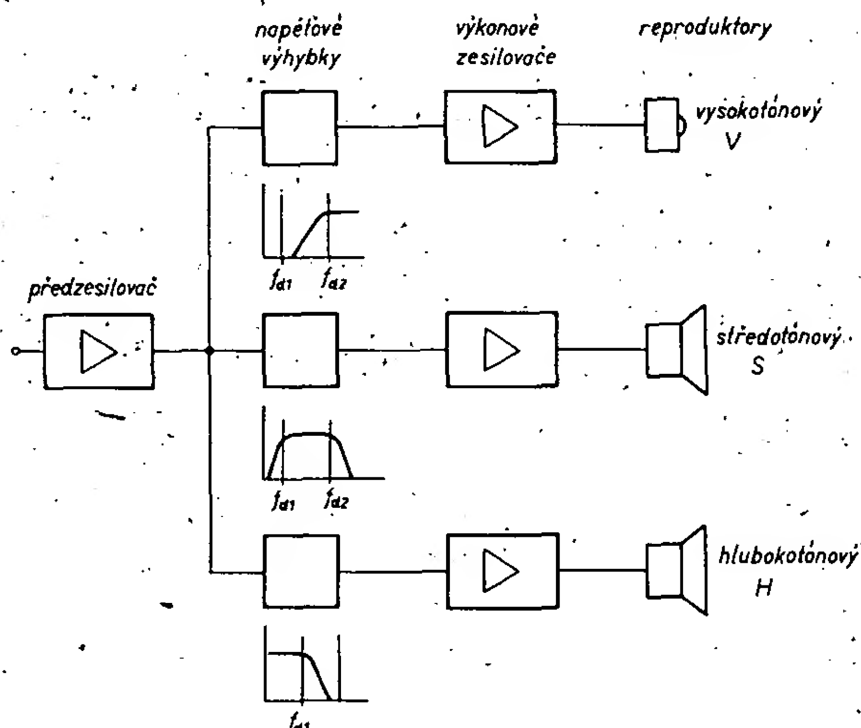
Je účelné zkontrolovat před montáží specifický akustický odpor použitého prodyšného materiálu a blíží-li se jeho velikost 50 Pa.s/m, zjistit měřením jeho vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku soustavy.

9. Aktivní reproduktorové soustavy

Jako aktivní reproduktorové soustavy jsou označovány jednotky, u nichž vlastní vícepásmová soustava a příslušné výkonové zesilovače včetně výhybek jsou umístěny ve společné skříni. Na vstup zesilovačů se přivádí již upravený elektrický signál o vhodné úrovni z napěťového výstupu magnetofonu, přijímače (tuneru) nebo jiného zdroje, případně z výstupu korekčního předzesilovače.

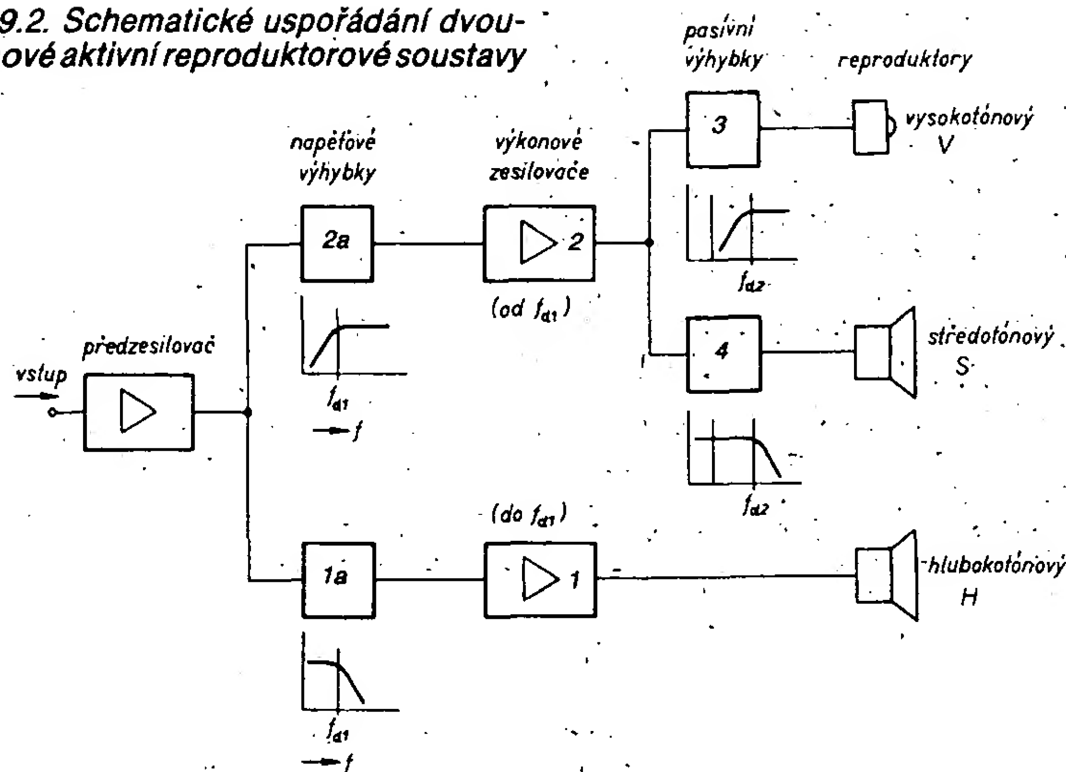
Aktivní reproduktorové soustavy bývají zpravidla třípásmové, přičemž bývají vybaveny dvěma nebo třemi výkonovými zesilovači.

Uspořádání aktivní soustavy se třemi zesilovači je na obr. 9.1. Vstupní signál je přiveden, po případném zesílení (které však není nezbytné) na napěťové výhybky, z jejich výstupů je na vstup výkonových zesilovačů přiveden již příslušně kmitočtově omezený signál, případně upravený tak, že kmitočtový průběh akustického signálu vyzářeného dílčími reproduktory je vyrovnaný. Výhybky mohou být pasívní (ovšem pouze napěťové) anebo aktivní. Lze bez obtíží použít výhybky druhého řádu nebo i řádů vyšších, bez nutnosti aplikovat nákladné tlumivky. Jediným požadavkem je, aby jednotlivá pásma na sebe náležitě navazovala. Není třeba starat se o kmitočtový průběh vstupních impedancí reproduktorů, jako při aplikaci



Obr. 9.1. Schematické uspořádání třípásmové aktivní reproduktorové soustavy

Obr. 9.2. Schematické uspořádání dvoupásmové aktivní reproduktorové soustavy



klasických pasívních výhybek, což je ovšem nesporná výhoda. Při volbě dělicích kmitočtů 400 a 4000 Hz bývají obvykle potřebné výkony jednotlivých zesilovačů v poměru 1 : (0,5 až 1) : 0,25.

V hlubokotónové části soustavy může být použit reproduktor ve spojení s uzavřenou anebo bass-reflexovou ozvučnicí. Výhodnější je ovšem provedení s bass-reflexovou ozvučnicí, protože v takovém případě může být díky větší citlivosti zářiče výkon hlubokotónového zesilovače menší, případně mohou být menší rozměry vyzařovací soustavy, podstatnou měrou ovlivněny rozměry její hlubokotónové části.

Kromě aktivní soustavy se třemi oddělenými zesilovači se v některých případech uplatňuje zjednodušené provedení se dvěma výkonovými zesilovači (obr. 9.2). V tomto případě napájí první zesilovač *1*, opatřený na vstupu napěťovou výhybkou *1a*, omezující signály v oblasti nejnižších kmitočtů (obvykle pod 30 až 35 Hz) a signály nad prvním dělicím kmitočtem (asi 400 až 500 Hz), hlubokotónový reproduktor (H).

Druhý zesilovač *2*, napájející středotónový a vysokotónový reproduktor, je na svém vstupu opatřen obvodem *2a*, uplatňujícím se jako druhá část výhybky.

Středotónový a vysokotónový reproduktor jsou napájeny z výstupu zesilovače *2* přes klasické pasívní výhybky *3* a *4*, obvykle druhého řádu.

Vedle popsaných aktivních soustav existují ještě vyzařovací jednotky se dvěma nebo třemi výkonovými zesilovači, u nichž je z výstupu hlubokotónového reproduktoru zavedena zpětná vazba do vstupu příslušného výkonového zesilovače. Je to v podstatě obnova již dávno známého principu, který teprve po mnoha letech nalezl technické uplatnění. Velmi výhodného způsobu zavedení zpětné vazby využívá u svých exkluzívních vyzařovacích jednotek firma Philips: Zpětnovazební napětí je tvořeno výstupním napětím akceleračního snímače, namontovaného na střední části membrány hlubokotónového reproduktoru (viz obr. 9.3). Protože je výstupní napětí akceleračního snímače úměrné urychlení membrány, je při konstantním vstupním napětí zesilovače udržováno také konstantní (nezávisle na kmitočtu). To platí ovšem jen do kmitočtu, do něhož urychlení kmitací cívky odpovídá co do velikosti i fáze výstupnímu napětí akceleračního snímače, tzn. jen do asi 300 až 400 Hz; to však pro daný případ postačí. Je-li urychlení membrány kmitočtově nezávislé, je také kmitočtově nezávislý akustický tlak před ní.

Přednost popsaného uspořádání spočívá v tom, že vzhledem k velkým urychlením membrány je i výstupní napětí akceleračního snímače dostatečně velké a lze je snadno dále zpracovat. Pro úplnost je vhodné mít na zřeteli, že urychlení membrány o ploše 2 dm² – jde například o reproduktor typu ARN 6604 – je při akustickém tlaku 1 Pa měřeném ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru (při vyzařování do poloprostoru) $a = 260\ \mathrm{m/s^2}$ (asi 26 g), což je hodnota značná. Při vhodné koncepci akceleračního snímače (v daném případě je nejvhodnější snímač piezoelektrický s pomocnou seizmickou hmotou), jehož průběh musí být kmitočtově nezávislý alespoň do čtyřnásobku horního mezního kmitočtu hlubokotónové části zářiče, může být taková rezerva výstupního signálu, že zesilovač umístěný v těsné blízkosti snímače, jaký například používá firma Philips, není nezbytný.

Problémy spojené se zachováním stability systému reproduktor-snímač-zesilovač lze poměrně snadno vyřešit. Podrobná analýza celé záležitosti, která není příliš složitá, se však vymyká rámci této publikace.

Vedle popsaného zpětnovazebního systému s akceleračním snímačem existuje ještě další velmi výhodný způsob zavedení zpětné vazby z výstupního obvodu reproduktoru. Vychází se z poznatku, že akustický tlak v blízkém poli přímovyzařujícího reproduktoru odpovídá akustickému tlaku co do velikosti i kmitočtového průběhu v poli vzdáleném. Stačí tedy, umístí-li se do těsné blízkosti membrány hlubokotónového reproduktoru tlakový mikrofon o kmitočtově nezávislém průběhu výstupního napětí (v oblasti nízkých a středních kmitočtů) a zavede-li se jeho výstupní napětí do vstupního obvodu zesilovače, napájejícího reproduktor (obr. 9.4). Lze však s úspěchem použít i gradientní mikrofon prvního řádu s výchylkovým elektromechanickým měničem. Pro stabilitu soustavy platí totéž jako v případě předešlém. Dolní mezní kmitočet použitého mikrofonu musí být co nejnižší (15 Hz).

Nesporná přednost tohoto uspořádání spočívá v tom, že lze použít běžný hlubokotónový reproduktor a to bez dalších nákladných úprav. Mikrofon však musí mít vyrovnaný kmitočtový průběh a musí zpracovat bez zkreslení značný akustický signál, který je v jeho blízkosti.

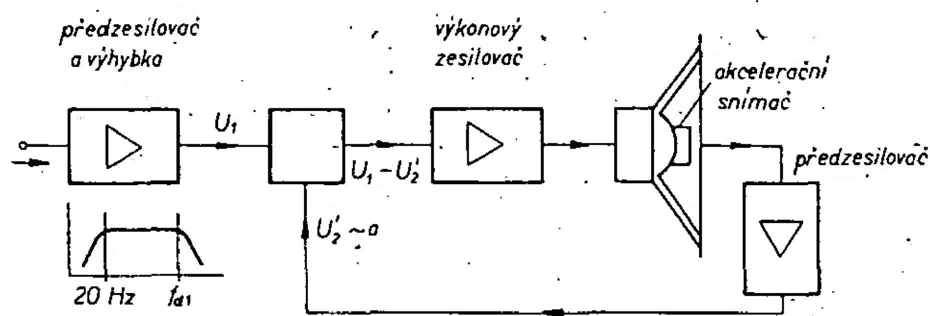
Určitou nevýhodou všech vyzařovacích jednotek s pohybem membrány řízeným zpětnou vazbou je to, že veškerý akustický výkon i v oblasti nízkých kmitočtů musí vyzářit membrána hlubokotónové jednotky. Pokud jsou požadovány větší akustické výkony v oblasti nízkých kmitočtů, je nutné, aby měl hlubokotónový reproduktor dostatečně velkou plochu membrány a velkou možnou maximální amplitudu (takzvané objemové pošinutí *Sy*) proto, že v daném případě nelze použít jinou ozvučnici, než uzavřenou.

Aktivní reproduktorové soustavy představují zajímavý krok ve vývoji jednotek pro vyzařování akustického signálu. Jejich hlavní nevýhodou je doposud neúnosně vysoká cena, o níž nelze předpokládat, že by se v dohledné době snížila (s ohledem na výrobní náročnost a do jisté míry i komplikovanost zařízení), i když elektretové tlakové mikrofony o velmi dobrých přenosových vlastnostech, které lze u nich aplikovat, jsou v současné době již velmi levné.

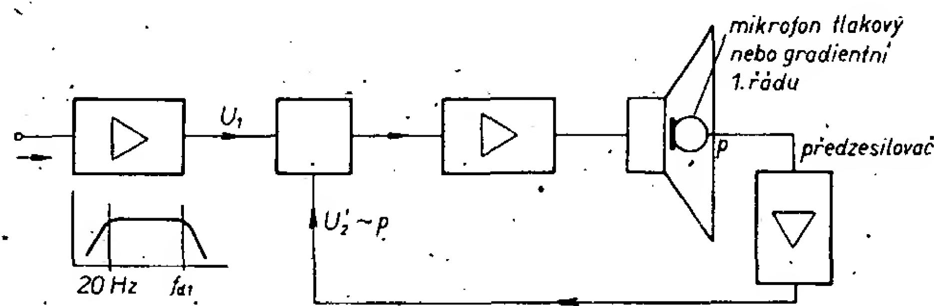
Nutno však konstatovat, že se jedná o uspořádání principiálně již dávno známé, viz například [4].

10. Měření reproduktorů a jednotek pro vyzařování akustického signálu

Znalost základních konstant a vlastností reproduktorů je nezbytně nutná pro jejich správnou aplikaci v ozvučnicích a reproduktorových soustavách. To se týká zejména hlubokotónových reproduktorů, u nichž výrobci (až na některé výjimky) uvádějí ve firemní literatuře jen nejzákladnější údaje, které však k návrhu nestačí. Proto je třeba tyto kusé informace doplnit vlastními měřeními. V rámci



Obr. 9.3. Hlubokotónová část aktivní reproduktorové soustavy se zpětnou vazbou zavedenou z akceleračního snímače spojeného s membránou hlubokotónového reproduktoru



Obr. 9.4. Hlubokotónová část aktivní reproduktorové soustavy se zpětnou vazbou zavedenou z mikrofonu umístěného v blízkém poli reproduktoru

této práce budou popsány měřicí metody, které lze aplikovat s minimálními prostředky. Bohužel ne vždy má i tyto prostředky běžný zájemce o obor elektroakustiky k dispozici.

10.1 Měření vlastností hlubokotónových reproduktorů

Pro aplikaci hlubokotónových reproduktorů jsou rozhodující údaje v kapitole 5.1. Jedná se v podstatě o 8 základních údajů, z nichž lze v podstatě odvodit všechny ostatní. Ve stručnosti je zde zopakujeme

- N[VA] jmenovitý příkon, případně špičkový krátkodobý příkon (N_{max}),
- S[m^2] aktivní plocha membrány, případně její aktivní průměr D_{akt},
- R_v odpor vinutí kmitací cívky, případně jmenovitá impedance reproduktoru,
- m_{ak} akustická (anebo mechanická m_m) hmotnost kmitacího systému,
- Bl, případně Bl/S, konstanta, udávající převod mezi elektrickou a mechanickou, případně akustickou stranou měniče,
- y_{max} maximální přípustná amplituda membrány v [mm], případně [m],
- f_{rez} rezonanční kmitočet kmitacího systému reproduktoru,
- Z_{rez} impedance reproduktoru při rezonančním kmitočtu.

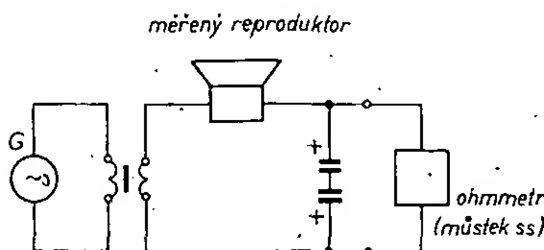
Ostatní veličiny, jako ekvivalentní objem V_{ekv}, citlivost η v kmitočtové oblasti, kdy membrána kmitá pístově, a elektrický činitel kvality Q_{el} lze ze základních veličin odvodit.

Do určité míry je zajímavá i citlivost reproduktoru v kmitočtové oblasti 250 až 4000 Hz (podle ČSN), která bývá obvykle poněkud větší než citlivost v oblasti nízkých kmitočtů a to proto, že zahrnuje vliv parciálních kmitů membrány v oblasti vyšších kmitočtů. To se týká středotónových reproduktorů nebo hlubokotónových reproduktorů pro dvoupásmové soustavy.

V běžných prospektech se uvádí jmenovitý příkon N, případně příkon krátkodobý, jmenovitá impedance Z_{jm} a případně i citlivost. Jak vyplývá z toho, co již bylo uvedeno, tyto údaje pro odpovědnou aplikaci reproduktorů naprosto nestačí. Proto je nezbytné další potřebné údaje zejména hlubokotónových reproduktorů určit měřením.

Odpor vinutí R_v kmitací cívky se určí nejsnáze běžným odporovým můstkem, pokud nás zajímá odpor kmitací cívky nezatíženého reproduktoru.

Zajímá-li nás odpor kmitací cívky zatíženého reproduktoru, z něhož lze určit oteplení cívky, je účelné jednoduché uspořádání podle obr. 10.1, při němž je



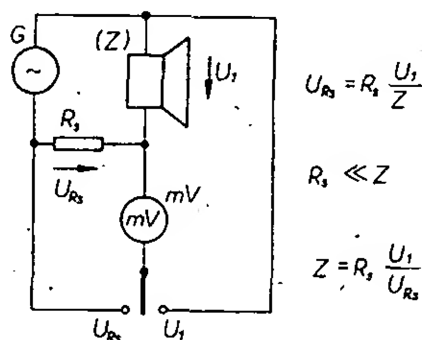
Obr. 10.1. Měření činného odporu kmitací cívky při zatížení

měřený reproduktor napájen ze zdroje signálu přes transformátor o malém odporu sekundárního vinutí a pomocný bipolární kondenzátor C o kapacitě volené tak, aby jeho impedance byla malá proti jmenovité impedanci reproduktoru. Pro běžné účely postačí sériová kombinace dvou elektrolytických kondenzátorů o kapacitě asi 5000 µF. Ze zvětšení odporu reproduktoru $\Delta R = R_t - R_v$ lze stanovit oteplení vinutí

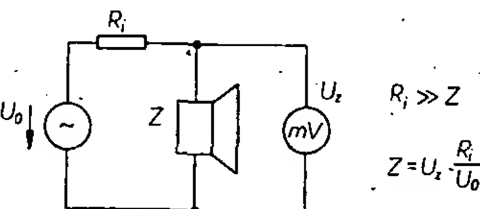
$$\Delta t \approx 256 \frac{\Delta R}{R_v} \quad [°C; \Omega] \qquad (10.1)$$

kde R_v je odpor kmitací cívky při běžné teplotě a R_t odpor při provozu reproduktoru. Při měření je nezbytné, aby odpor sekundárního vinutí transformátoru byl zanedbatelně malý ve srovnání s odporem kmitací cívky. Oteplení Δt u běžných reproduktorů nemá být při trvalém zatížení větší než 80 až 120 °C (podle použité izolace).

Řada dalších měření vychází z elektrické impedance kmitací cívky reproduktoru. Tuto impedanci lze stanovit buď vhodným měřičem impedance, na němž lze určit i její fázový úhel (například Grützmacherovým můstkem anebo jiným vhodným uspořádáním, viz např. [7] str. 81), nebo jednoduchým improvizovaným měřičem podle obr. 10.2, popř. 10.3.



Obr. 10.2. Měření elektrické impedance reproduktoru



Obr. 10.3. Informativní měření elektrické impedance reproduktoru (vhodné zejména pro měření v nadrezonanční oblasti)

U prvního uspořádání, které dává přesnější výsledky již také proto, že napětí na reproduktoru U_1 je prakticky konstantní, lze měřit impedanci při větším vybuzení reproduktoru. Impedanci je však nutné pro každý měřicí bod vypočítat. U uspořádání podle obr. 10.3 lze zvolit napětí generátoru U tak, aby napětí U_z v mV odpovídalo měřené impedanci. V tomto případě musí být měřicí proud v obvodu 1 mA a tedy $Ri = 1000U_0$.

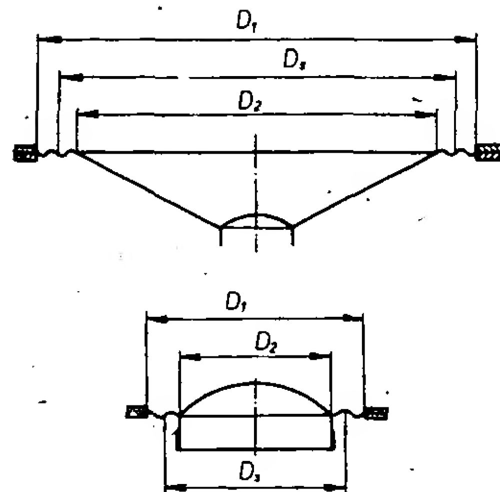
Maximální měřená impedance nemá být větší než $R_1/100$.

Nevýhodou této metody je, že napětí na měřeném objektu je proměnné, což může za určitých okolností ovlivnit spolehlivost měření (zejména při měřeních, při nichž se vychází z rezonančního kmitočtu reproduktoru, který bývá značně závislý na měřicím napětí).

Aktivní plochu membrány stanovíme z aktivního průměru membrány, který je přibližně roven střední hodnotě vnějšího průměru okraje vlnky membrány a vnitřního průměru této vlnky, přibližně rovného vnějšímu průměru membrány (obr. 10.4). Pak

$$D_{akt} = (D_1 + D_2)/2 \qquad (10.2)$$

a aktivní plocha membrány



Obr. 10.4. Stanovení přibližného aktivního průměru reproduktoru

$$S_{akt} = \frac{\pi}{4} D_{akt}^2 \qquad (10.3).$$

Rezonanční kmitočet reproduktoru f_r lze určit u samotného reproduktoru bez ozvučnice, u reproduktoru *umístěného* v otvoru dostatečně velké deskové ozvučnice, případně u reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici. Při tomto měření je nutno mít na zřeteli, že rezonanční kmitočet obvykle značně závisí na svorkovém napětí měřeného objektu. Při malém napětí (do 1/1000 jmenovitého napětí) je rezonanční kmitočet málo závislý na napětí, při napětí odpovídajícímu asi 1/10 až 5/10 jmenovitého napětí se rezonanční kmitočet snižuje a při dalším zvětšování napětí se začíná opět zvyšovat. Rozdíly mezi naměřenými údaji mohou být podle typů reproduktorů v rozmezí až 10 % (i více). Je to způsobeno proměnnou poddajností uložení kmitacího systému.

Při zjišťování rezonančního kmitočtu reproduktoru se vychází z poznatku, že elektrická impedance reproduktoru je při rezonančním kmitočtu maximální. V uspořádání nejlépe podle obr. 10.2 se určí kmitočet, při němž je napětí na pomocném odporu minimální; tento kmitočet odpovídá hledanému rezonančnímu kmitočtu f_{rez}.

Je účelné stanovit rezonanční kmitočet pro velmi malé napětí U na svorkách reproduktoru, z něhož lze vycházet při stanovení hmotnosti kmitajícího systému (řádově $U = 10^{-2}\sqrt{N_n Z_n}$) a pro napětí odpovídající asi 1/2 jmenovitého napětí (při čtvrtině jmenovitého příkonu). Tato hodnota, pokud je stanovena u reproduktoru upevněného v otvoru deskové ozvučnice, má význam pro jeho aplikaci v uzavřené ozvučnici.

Hmotnost kmitacího systému reproduktoru se určí z rezonančního kmitočtu reproduktoru f_r a rezonančního kmitočtu f'_r, kdy je membrána zatížena pomocnou hmotností m_p. Při měření lze postupovat tak, že se položí měřený reproduktor na magnet membránou vzhůru (bez ozvučnice) a změří se rezonanční kmitočet f_r při velmi malém svorkovém napětí (asi 1/100 napětí jmenovitého). Pak se položí na membránu závaží o hmotnosti m_p, která je 2 až 5krát větší než předpokládaná hmotnost kmitacího systému a změří se znovu rezonanční kmitočet f'_r. Závaží musí přitom klidně spočívat na membráně a musí s ní spolukmitat (bez znatelného poskakování) jako celek.

$$m_{m1} = \frac{m_p}{(f_r/f'_r)^2 - 1} \qquad (10.4)$$

a jeho akustická hmotnost

$$m_{ak,1} = m_m \frac{1}{S^2} \quad (10.5).$$

Při umístění reproduktoru v ozvučnici bude hmotnost kmitacího systému zvětšena přibližně o hmotnost spolukmitajícího vzduchu, tedy o

$$m_{vzd} = \varrho . 0{,}43 . \pi R^3 = 0{,}2D^3 \text{ [kg; m]} \quad (10.5),$$

což je hodnota mechanická, anebo

$$m_{vzd,ak} \doteq 0{,}33/D \quad \text{[kg/m}^4\text{; m]} \quad (10.5a),$$

pokud nás zajímá hodnota akustická.

Pak je celková hmotnost kmitajícího systému membrány včetně spolukmitajícího vzduchu

$$m_{ak,c} = m_{ak1} + m_{ak,vzd} \quad (10.6),$$

s níž je nutno počítat u reproduktoru vestavěného do skříňové ozvučnice. Rezonanční kmitočet reproduktoru, z něhož nutno vycházet při návrhu ozvučnice, je dán vztahem:

$$f_{r1} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}}}} \quad (10.7)$$

Ekvivalentní objem ozvučnice V_{ekv} lze vypočítat z hmotnosti kmitacího systému m_m, případně $m_{ak,1}$ a z rezonančního kmitočtu f_r ze vztahu

$$V_{ekv} = \frac{\varrho c^2}{(2\pi f_r)^2 m_{ak,1}} = \frac{3{,}55.10^3}{f_r^2 m_{ak,1}}$$

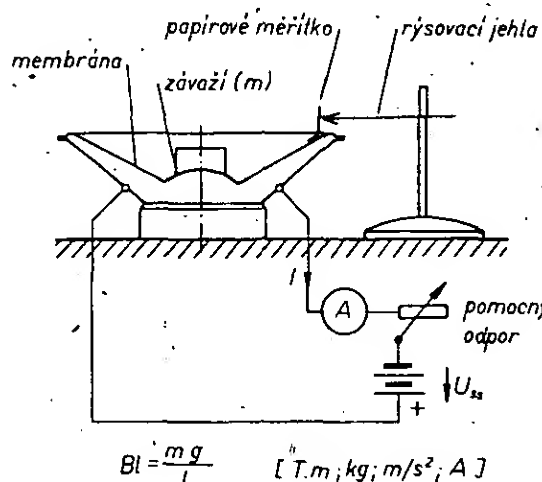
$$\text{[m}^3\text{; Hz, kg/m}^4\text{]} \quad (10.8)$$

$$V_{ekv} = \frac{3{,}55.10^6}{f_r^2 m_{ak,1}} \quad \text{[l; Hz, kg/m}^4\text{]} \quad (10.8a)$$

Konstantu Bl, případně Bl/S lze stanovit několika způsoby. Nejjednodušší je způsob statický, při němž se membrána reproduktoru položeného na stole osou vzhůru zatíží závažím o hmotnosti m; přičemž se známým stejnosměrným proudem I, zavedeným do kmitací cívky, průhyb membrány způsobený závažím vyrovná. Pak lze Bl vypočítat z výrazu

$$Bl = \frac{mg}{I} \quad \text{[T.m; kg, m/s}^2\text{, A]} \quad (10.9),$$

kde g je tíhové zrychlení ($\doteq$ 10 m/s²). Výchylku membrány čteme na měřítku, přilepeném na membráně reproduktoru (viz obr. 10.5).



Obr. 10.5. Statické měření konstanty Bl reproduktoru

Hodnotu Bl lze dále určit z měření elektrické impedance reproduktoru, uloženého na stole podle obr. 10.5. Postup je tento:

Při dostatečně malém měřicím napětí (jako při zjišťování hmotnosti kmitacího systému) se určí rezonanční kmitočet f_{rez} a impedance reproduktoru při tomto kmitočtu (Z_{rez}). Přitom je nutno znát činný *odpor vinutí kmitací cívky* R_v. V dalším se zatíží membrána závažím o hmotnosti m_p (o hmotnosti rovné asi polovině hmotnosti kmitacího systému, na skutečné velikosti příliš nezáleží), načež se znovu změří vstupní impedance Z_m reproduktoru za tohoto stavu. Použité závaží přednostně ve tvaru prstence, případně zhotoveného z plastického materiálu, například z plasteliny anebo colorplastu, *musí při měření* klidně spočívat na membráně reproduktoru.

Hledanou hodnotu Bl pak vypočteme ze vztahu:

$$Bl = \sqrt{2\pi f_r m_p (Z_{rez} - R_v)} \sqrt[4]{\frac{Z_m^2 - R_v^2}{Z_{rez}^2 - Z_m^2}}$$

$$\text{[T.m; Hz, kg, } \Omega\text{]} \quad (10.10).$$

Hodnotu Bl/S stanovíme vydělením určené velikosti Bl aktivní plochou membrány.

Činitel jakosti reproduktoru můžeme stanovit s dostatečným přiblížením rovněž z měření absolutních hodnot impedance reproduktoru a to jak pro reproduktor bez ozvučnice, tak pro reproduktor na pomocné deskové ozvučnici, anebo i reproduktor vestavěný v uzavřené ozvučnici.

Stanoví se již popsanými způsoby činný odpor kmitající cívky a impedance Z_{rez} při rezonančním kmitočtu f_{rez}. Pro geometrickou střední hodnotu Z_{rez} a R_v

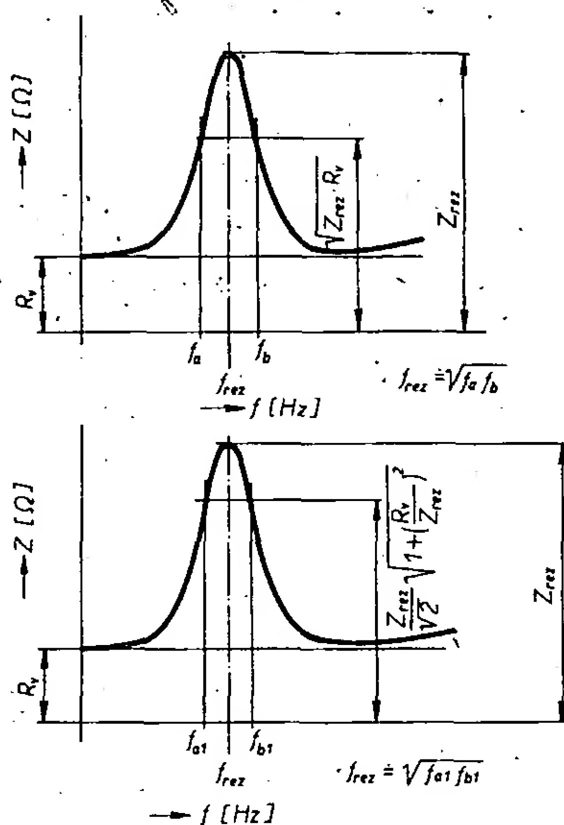
$$Z_{stř} = \sqrt{Z_{rez} R_v} \quad (10.11)$$

se určí kmitočty f_a a f_b, při nichž má reproduktor tuto střední velikost impedance. V dalším si stanovíme

$$A = \sqrt{Z_{rez}/R_v} \quad (10.12),$$

$$A' = A - \frac{1}{A} \quad (10.13),$$

$$F = \frac{\sqrt{f_a f_b}}{f_b - f_a} \quad (10.14),$$



Obr. 10.6. Určení činitelů kvality přímovyzařujícího dynamického reproduktoru z kmitočtového průběhu jeho vstupní impedance

z nichž lze určit všechny tři potřebné činitele jakosti reproduktoru (obr. 10.6a)

$Q_0 = AF$ (mechanický činitel jakosti, činitel naprázdno) (10.15),
$Q_{el} = F/A'$ (elektrický činitel jakosti) (10.16),
$Q_c = F/A$ (celkový činitel jakosti) (10.17).

všechny vztažené na rezonanční kmitočet reproduktoru.

Pomocná metoda dává vyhovující výsledky, pokud kmitočet f_b není vyšší než kmitočet, při němž elektrická impedance reproduktoru není ještě příliš ovlivněna reaktancí kmitací cívky.

Jiná metoda stanovení činitelů jakosti reproduktoru použitelná v případě, že f_b je příliš vzdálen od f_{rez}, je patrná z obr. 10.6b. I tato metoda vychází z kmitočtového průběhu vstupní impedance reproduktoru, ale f_{a1} a f_{b1} jsou kmitočty, při nichž se zmenší vstupní impedance na

$$Z = \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{rez} \sqrt{1 + \left(\frac{R_v}{Z_{rez}}\right)^2} \quad (10.18).$$

Činitele jakosti reproduktoru pak jsou:

$$Q_0 = \frac{f_r}{f_{b1} - f_{a1}} \quad (10.19),$$

$$Q_{el} = Q_0 \frac{R_v}{Z_{rez} - R_v} \quad (10.20),$$

$$Q_c = Q_0 \frac{R_v}{Z_{rez}} \quad (10.21).$$

Jinak lze ovšem při známém Bl stanovit činitele jakosti reproduktoru výpočtem:

$$Q_0 = \frac{2\pi f_r m_m}{(Bl)^2} (Z_{rez} - R_v) \quad (10.22),$$

$$Q_{el} = \frac{2\pi f_r m_m}{(Bl)^2} R_v \quad (10.23),$$

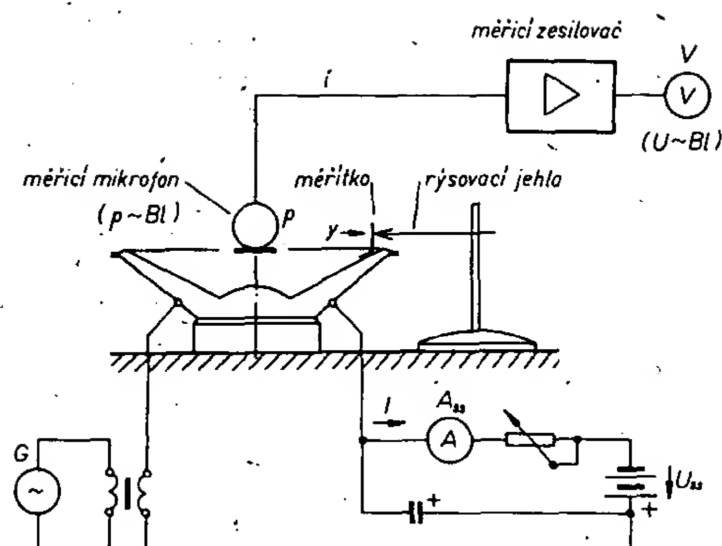
$$Q_c = Q_{el} \frac{Z_{rez} - R_v}{Z_{rez}} = \frac{Q_{el} Q_0}{Q_{el} + Q_0} \quad (10.24).$$

Z jakostí Q, stanovených pro reproduktor bez ozvučnice, lze s dostatečným přiblížením určit příslušné činitele jakosti, platící pro tentýž reproduktor, vestavěný ve skříňové ozvučnici. Původně určené hodnoty je třeba pouze vynásobit činitelem $\sqrt{1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}}}$, přičemž $m_{vzd,ak}$ je dáno výrazem (10.5a).

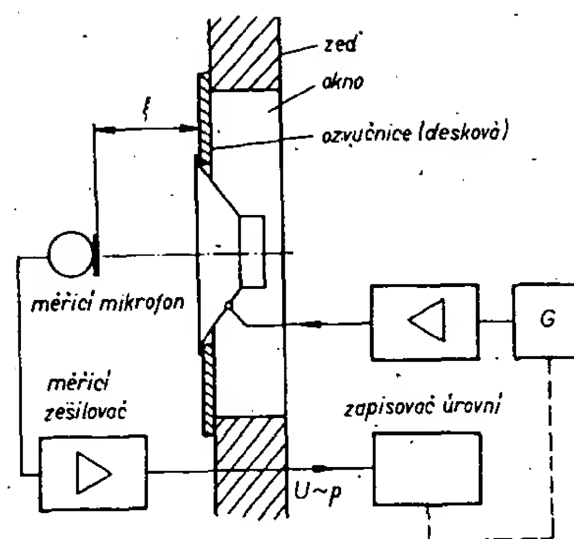
Z doposud naměřených údajů na reproduktoru bez ozvučnice lze s dostatečným přiblížením určit jeho citlivost v nadrezonanční oblasti (za předpokladu pístového kmitání membrány) ze vztahu

$$\eta_{dB} = 52{,}1 + 10\log \frac{f_{rez}^3 V_{ekv}}{Q_{el}} - $$
$$+ 20\log \left(1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}}\right) \quad (10.25).$$

Maximální možnou amplitudu membrány, která je obvykle omezena zmenšením Bl v závislosti na výchylce, lze stanovit při uspořádání podle obr. 10. 7. Na svorky měřeného reproduktoru se přivede z výstupu generátoru výstupním transformátorem budicí signál. Budicí napětí má být v tomto případě maximálně 1/10 jmenovitého napětí reproduktoru. V blízkém poli (asi 5 až 10 cm od středové kopule membrány) je umístěn měřicí mikrofon, na jehož výstup je připojen voltmetr. Do vinutí kmitací cívky se přivádí stejnosměrný proud, který vychyluje membránu z klidové polohy. Výchylku membrány čteme

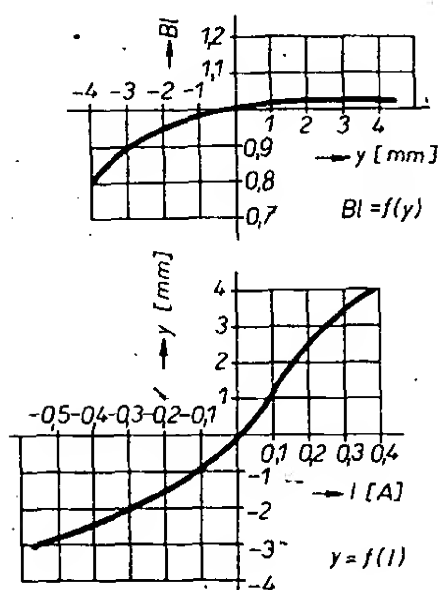


Obr. 10.7. Uspořádání pro zjištění závislosti Bl na amplitudě membrány hlubokotónového reproduktoru (Bl = f(y))



Obr. 10.10. Měření kmitočtového průběhu reproduktoru při vyzařování do poloprostoru

na měřítku, přilepeném na jejím okraji. Při měření se postupuje takto: nastavíme hladinu budicího signálu o kmitočtu asi 3 až $5f_{roz}$ tak, aby na vhodném rozsahu voltmetru na výstupu měřicího mikrofonu byla výchylka nejlépe na dílku 10, což reprezentuje referenční hodnotu Bl = 100 %. Do obvodu reproduktoru zavedeme takový stejnosměrný proud, aby se membrána vychýlila vzhůru, v kladném směru, o zvolenou výchylku y (například o 1 mm). Potřebný stejnosměrný proud I a napětí na výstupu mikrofonu, které je úměrné Bl, se změří a vynesou do grafů (obr. 10.8). Tak se postupuje dále pro pozitivní i negativní výchylku membrány (pro změnu polarity výchylky stačí pouze



Obr. 10.8. Závislost Bl = f(y) nesprávně sestaveného hlubokotónového reproduktoru (kmitací systém je trvale vychýlen dovnitř reproduktoru)

přepólovat svorky reproduktoru). Z grafů se pak zjistí možná výchylka membrány, při níž se nesmí enormně zmenšit Bl, ani omezit amplituda vlivem nelinearity uložení. Obvykle limituje využitelnou výchylku zmenšení Bl, zejména tehdy, je-li kmitací systém vlivem nesprávné montáže vysunut ze své optimální polohy (což se projeví nesymetrií křivky na obr. 10.8).

Kmitočtový průběh reproduktoru možno stanovit jednoduchými prostředky, bez použití obvykle těžko dostupné bezdozvukové komory třemi způsoby a to:

a) měřením v blízkém akustickém poli reproduktoru,
b) měřením ve volném poli, venku,
c) měřením v uzavřené místnosti ve vzdálenosti mikrofonu od ústí reproduktoru značně menší, než je dozvuková vzdálenost místnosti.

Ve všech případech je ovšem nezbytný měřicí mikrofon, který lze vyhovujícím způsobem pro přibližná měření nahradit elektretovým mikrofonem spojeným s integrovaným předzesilovačem, který se používá u některých kazetových magnetofonů. Tyto mikrofony o vnějším průměru asi 12 mm mají velmi vyrovnaný kmitočtový průběh od nejnižších kmitočtů až do 8 až 10 kHz.

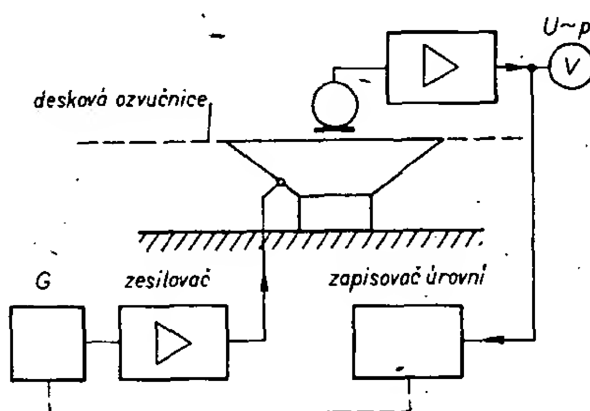
a) Měření přenosových vlastností reproduktorů v blízkém poli

Měření lze uskutečnit jak u reproduktoru bez ozvučnice, tak s deskovou ozvučnicí. Tlakový měřicí mikrofon se umístí do středu membrány, ve vzdálenosti 20 až 30 mm od jejího vrcholu. Napětí na svorkách reproduktoru se volí tak, aby hladina akustického tlaku v místě mikrofonu nepřekročila velikost, kterou je mikrofon schopen zpracovat (u elektretového mikrofonu s předzesilovačem nemá výstupní napětí překročit 50 mV).

Kmitočtový průběh lze měřit buď bod po bodu, nebo registrací výstupní úrovně, a to od nejnižších kmitočtů až do kmitočtu

$$f = \frac{c_0}{2\pi D}\ [\text{Hz; m/s, m}] \doteq \frac{55}{D}\ [\text{Hz; m}].$$

Základní uspořádání je na obr. 10.9.



Obr. 10.9 Uspořádání pro měření kmitočtového průběhu reproduktoru v blízkém akustickém poli (měření bez ozvučnice nebo s deskovou ozvučnicí)

Z naměřeného kmitočtového průběhu lze mimo jiné stanovit přímo i celkový činitel jakosti Q_c reproduktoru, který je podílem akustického tlaku při rezonančním kmitočtu reproduktoru (odpovídajícímu příslušnému výstupnímu napětí mikrofonu $U_{f_{rez}}$), k výstupnímu napětí U v oblasti nadrezonanční, v níž je kmitočtový průběh kmitočtově nezávislý). Pro celkový činitel jakosti pak platí

$$Q_c = \frac{U_{f_{rez}}}{U} \qquad (10.26).$$

Popsané měření lze s dostatečnou spolehlivostí uskutečnit v běžné, akusticky neupravené místnosti, a to jak u reproduktoru bez ozvučnice, tak u reproduktoru vestavěného ve standardní ozvučnici, nebo konečně u reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici.

b) Měření reproduktoru ve volném akustickém poli

Reproduktor je podle obr. 10.10 umístěn v otvoru deskové ozvučnice, zakrývající okno měřicí místnosti. Desková ozvučnice má pokud možno lícovat s vnější stěnou budovy, s níž tvoří rozlehlou rovinnou ozvučnici.

Měřicí mikrofon je umístěn v ose reproduktoru, nebo ve směru odchýleném od této osy, ve vzdálenosti ξ (asi 1 m) od ústí reproduktoru. Reproduktor má být na ozvučnici montován zepředu.

Důležité je, aby ve směru prodloužené osy reproduktoru nebyla rozlehlá překážka, od níž by se odrážel zpět vyzářený akustický signál.

Při popsaném uspořádání lze zjistit kromě kmitočtového průběhu také směrové charakteristiky reproduktoru, nelineární zkreslení i citlivost reproduktoru (viz ČSN 368265, článek 83), když se stanoví střední hladina p_s [dB] akustického tlaku v kmitočtovém pásmu 250 až 4000 Hz ve vzdálenosti ξ = 1 m, při svorkovém napětí reproduktoru

$$U = \sqrt{1 \times Z_n}, \qquad (10.27),$$

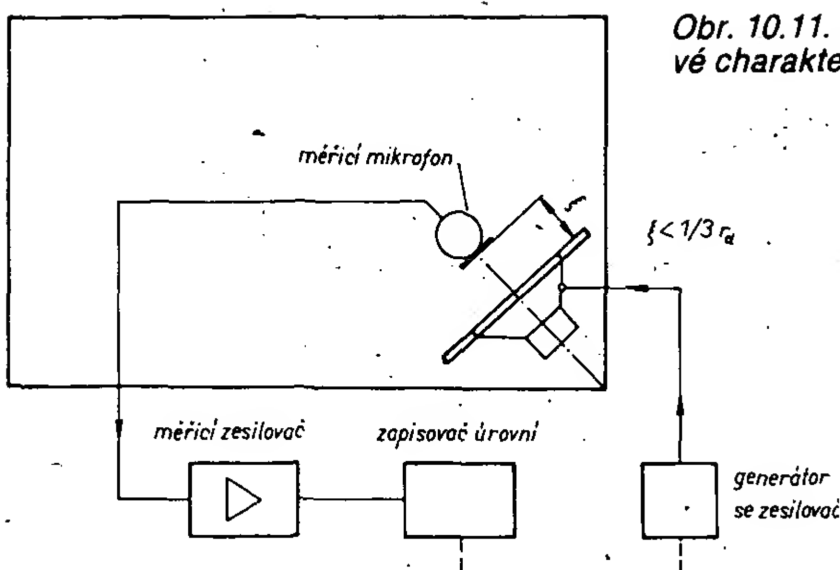
kde Z_n je jeho jmenovitá impedance.

Stejným způsobem lze zjistit kmitočtový průběh jakékoli reproduktorové soustavy. Popsaná metoda je zcela exaktní.

c) Měření reproduktoru v uzavřené místnosti

Pokud není možné improvizovat měření podle b), lze získat alespoň informativní údaje o daném reproduktoru měřením v uzavřené místnosti, která má být dostatečně akusticky tlumená alespoň běžným nábytkem a má mít objem větší než 60 m³.

Reproduktor se připevní na deskovou ozvučnici o rozměrech alespoň 1,2 × 1,2 m (opět zepředu) a to mírně excentricky (tj. umístí se blíže k rohu místnosti, aby osa reproduktoru směřovala přibližně do protějšího rohu, obr. 10.11). V ose reproduktoru je situován opět měřicí mikrofon, jehož vzdálenost od ústí reproduktoru má být nejvýše 1/3 dozvukové vzdálenosti místnosti, dané vztahem



Obr. 10.11. Informativní zjištění kmitočtové charakteristiky reproduktoru v uzavřené místnosti

$$r_d = \sqrt{\frac{V}{314T}} \quad [\text{m; m}^3, \text{s}] \quad (10.28),$$

kde V je objem místnosti a T doba dozvuku, která u místnosti běžně vybavené nábytkem nebývá v oblasti středních a vysokých kmitočtů delší než 0,6 s. V takovém případě bývá dozvuková vzdálenost asi 0,6 m a tedy vzdálenost mikrofonu od ústí reproduktoru má být asi 0,2 m.

Takto zjištěná kmitočtová charakteristika, kterou je nejlépe registrovat, dává hrubý obraz o přenosových vlastnostech reproduktoru a to od kmitočtu

$$f = \frac{c_0}{2a} \doteq \frac{172}{a} \quad [\text{Hz; m}] \quad (10.29),$$

kde a je délka hrany použité deskové ozvučnice. Kmitočtový průběh lze doplnit v oblasti nízkých kmitočtů průběhem, zjištěným v blízkém akustickém poli podle a).

K tomuto měření je účelné použít úzkopásmový šumový signál buď o konstantní šířce pásma (případně tón kolísavý), nebo třetinooktávový šum (pak se musí použít generátor růžového šumu). Měření však pro amatérské účely není pro velké nároky na přístrojové vybavení příliš vhodné.

10.2 Měření vlastností středotónových a vysokotónových reproduktorů

U těchto reproduktorů je nutno znát kmitočtový průběh vstupní impedance, který se stanoví obdobným způsobem jako u reproduktorů hlubokotónových (obr. 10.2). U středotónových reproduktorů je třeba kontrolovat průběh impedance i při připojení pomocného korekčního obvodu R, C, kterým se dosáhne vyrovnání impedance v oblasti vysokých kmitočtů.

Kmitočtový průběh středotónového a vysokotónového reproduktoru se stanoví buď měřením podle obr. 10.10 (vyzařování do volného poloprostoru), nebo v uzavřené místnosti podle obr. 10.11. Rozměry ozvučnice mohou být asi 1 × 1 m u reproduktoru středotónového a 0,5 × 0,5 m u reproduktoru vysokotónového. V obou případech lze určit i citlivost reproduktoru, a to ze střední hodnoty akustického tlaku, přepočteného na vzdálenost 1 m, podle vzorce

$$\eta = p_s \xi \quad (10.30),$$

kde p_s je střední akustický tlak naměřený ve vzdálenosti ξ [m] od ústí reproduktoru při budicím napětí $U = Z_n$ [V; Ω]. Hladina citlivosti pak je

$$\eta_{dB} = 20\log\eta + 94 \quad [\text{dB}/\sqrt{\text{VA}}/\text{m}] \quad (10.31).$$

Důležité je měření směrové charakteristiky, které přichází v úvahu zejména u vysokotónových reproduktorů. Zde se stanoví pro jednotlivé kmitočty a určité vstupní napětí závislost hladiny akustického tlaku na úhlu, který svírá spojnice měřicího mikrofonu s referenčním bodem reproduktoru.

Při všech měřeních musí lícovat čelní plocha reproduktorů s použitou pomocnou ozvučnicí.

Nelineární zkreslení lze měřit při uspořádání podle obr. 10.10 a s určitým přiblížením i podle obr. 10.11.

10.3 Měření na reproduktorových soustavách

U reproduktorových soustav nutno kontrolovat tyto vlastnosti:
a) kmitočtový průběh vstupní impedance,
b) kmitočtový průběh, směrové charakteristiky a nelineární zkreslení,
c) citlivost.

10.3.1 Kmitočtový průběh vstupní impedance reproduktorové soustavy

Vstupní impedanci reproduktorové soustavy co do velikosti i fáze lze stanovit měřením na vhodném můstku, například Grützmacherově. Pro běžné účely postačí průběh absolutní velikosti této impedance. Pro měření lze aplikovat uspořádání podle obr. 10.2, jako pro měření elektrické impedance samotných reproduktorů. Doporučuje se měřit při 1/10 jmenovitého napětí. Měřit lze buď bod po bodu, tj. měřit spád napětí na pomocném rezistoru (což je metoda realizovatelná s minimálním přístrojovým vybavením), anebo lze průběh kontinuálně registrovat na měřiči hladin jako funkci kmitočtu (jde o metodu použitelnou v laboratoři).

10.3.2 Stanovení kmitočtového průběhu soustavy, jejích směrových vlastností a citlivosti

Reprezentativní výsledky uvedených měření lze získat nejsnáze při uspořádání podle obr. 10.10, kdy se reproduktorová soustava umístí do okna a nechá vyzařovat do poloprostoru.

Jiné možné a přitom velmi výhodné uspořádání zářiče a měřicího mikrofonu je na obr. 10.12, kdy je vyzařovací soustava umístěna v zemi tak, aby její čelní plocha lícovala s povrchem země. Analogicky lze měřit na ploché střeše. Měřicí mikrofon je přitom umístěn opět v ose soustavy, která je určena referenčním bodem na její přední stěně. Tento referenční bod, který udává výrobce, bývá obvykle v blízkosti vysokotónového zářiče. Vzdálenost měřicího mikrofonu od referenčního bodu, která je předepsaná ČSN, se volí obvykle 3 až 4krát větší, než je čelní rozměr soustavy (případně vzdálenost jeho zářičů).

Směrové vlastnosti soustavy velmi dobře charakterizuje soustava kmitočtových průběhů, získaných pro různé odchylky spojnice měřicího mikrofonu s referenčním bodem soustavy od její hlavní osy, obvykle kolmé k čelní desce soustavy.

Zajímavé jsou průběhy pro různé směry uvažované v horizontální rovině soustavy (kdy bývá obvykle úhel k vyzařování širší) a v rovině vertikální, kdy při svislém uspořádání zářičů bývá vyzařovací úhel menší. Taková soustava kmitočtových průběhů je pro názornost na obr. 10.13.

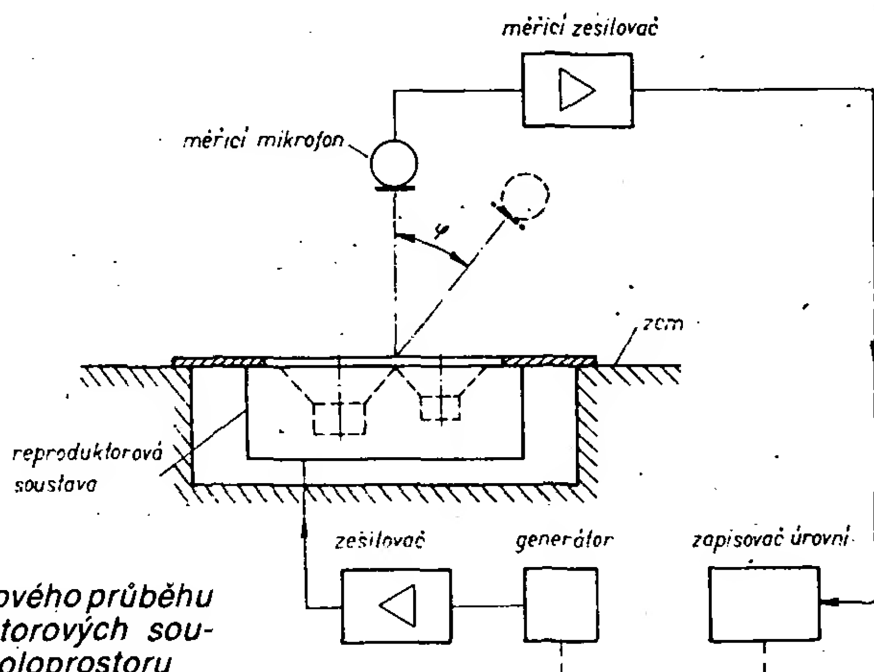
Z kmitočtového průběhu při znalosti střední hladiny akustického tlaku p_s v rozmezí 250 až 4000 Hz, měřené ve vzdálenosti ξ, a napětí U na svorkách soustavy o jmenovité impedanci Z_0 lze stanovit její citlivost buď v lineárním měřítku (Pa/1 VA/1 m) nebo v dB.

$$\eta = (p_s/\sqrt{N})\,(\xi/1) \quad [\text{Pa; VA, m}]$$

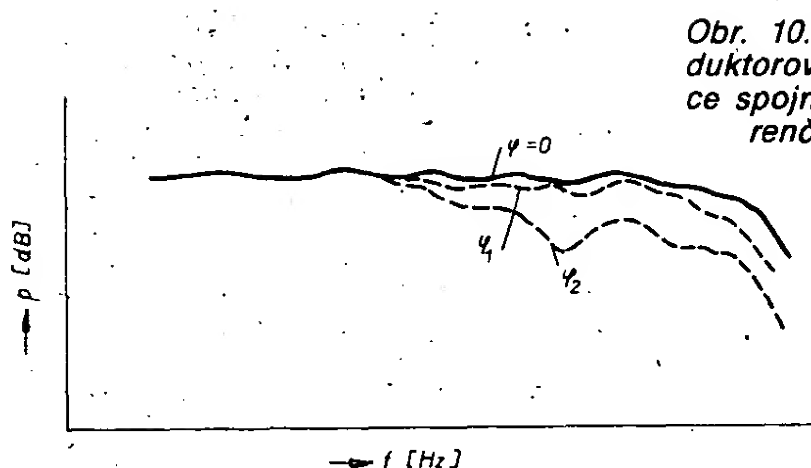
$$\eta_{dB} = 94 + 20\log p_s\xi \quad [\text{dB}, \sqrt{\text{VA}}/\text{m}].$$

Není-li možnost uskutečnit popsané exaktní měření, lze pro hrubou informaci použít kombinaci měření v blízkém poli v oblasti nízkých kmitočtů a měření ve vzdálenosti menší než poloměr dozvuku místnosti, v níž se měření uskutečňuje. Tímto způsobem lze získat jen přibližný relativní kmitočtový průběh bez údaje citlivosti.

Při měření reproduktorové soustavy s uzavřenou ozvučnicí lze stanovit kmitočtový průběh v oblasti nízkých kmitočtů měřením v blízkém poli hlubokotónového reproduktoru. Jde ovšem pouze o relativní průběh, což ve většině případů postačí.



Obr. 10.12. Měření kmitočtového průběhu reproduktorů a reproduktorových soustav při vyzařování do poloprostoru



Obr. 10.13. Kmitočtové průběhy reproduktorové soustavy v závislosti na odchylce spojnice měřicího mikrofonu s referenčním bodem od osy soustavy

Další relativní průběhy se stanoví při umístění měřicího mikrofonu mezi sousedními reproduktory, jejichž přenášená pásma na sebe navazují a to ve vzdálenosti asi 10 až 20 cm od čelní stěny ozvučnice. Výsledný kmitočtový průběh je třeba sestavit ze zaznamenaných průběhů dílčích.

Pokud je pro reprodukci signálů o nízkých kmitočtech použit zářič s bass-reflexovou ozvučnicí, měřicí mikrofon při kontrole hlubokotónové části (při měření v blízkém poli) se umístí mezi okraj hlubokotónového reproduktoru a okraj výstupu bass-reflexového hrdla, do vzdálenosti asi 10 až 15 cm od čelní desky zářiče.

Ostatní části kmitočtové charakteristiky se určí jako u soustavy s uzavřenou ozvučnicí a obdobně se sestaví celková kmitočtová charakteristika.

Takto stanovená kmitočtová charakteristika má ovšem jen informativní význam. Hrubé závady soustavy jsou však na ní dostatečně zřetelně patrné.

Měřením v blízkém poli lze určit i nelineární zkreslení (pokud ovšem zkreslení měřicího mikrofonu je i při vyšších hladinách zvuku dostatečně malé).

11. Závěr

Pro dosažení opravdu kvalitního poslechu musí být splněno několik základních podmínek, z nichž některé jsou všeobecně známé, jiné si přes jejich nespornou důležitost často ani neuvědomujeme.

Základním požadavkem je ovšem kvalitní snímek, který je reprodukován a to jak po stránce technické, tak i hudební. Velmi důležitý je způsob snímání signálu (rozmístění účinkujících ve studiu, umístění mikrofonů) a akustické vlastnosti studia, v němž je snímek pořizován. Dobrá technická úroveň záznamového zařízení i mikrofonů je v současné době již samozřejmostí. To, co zde bylo právě řečeno, se týká v prvé řadě snímků tzv. vážné hudby. U snímků tzv. „pop-music", které bývají obvykle uměle sestavovány ze záznamů jednotlivých hlasů snímaných v těsné blízkosti sólistů nebo nástrojových skupin, je situace ovšem jiná. Snímek je pořizován více či méně synteticky a tak se vliv akustických vlastností studia prakticky neuplatní. Nejde obvykle také o snímek, u něhož by byla snaha dosáhnout přirozené a věrné reprodukce, protože v tomto případě se jedná v nejlepším případě o reprodukci určité zvukové představy hudebního režiséra snímku, popř. v mezích možnosti o reprodukci zvukového obrazu, který byl vytvořen v režijní místnosti při konečné revizi snímku, vzniklého aplikací nejrůznějších pomocných zařízení (dozvukových zařízení, korekčních zesilovačů, zařízení umožňujících různé pseudostereofonní efekty, a často i zařízení záměrně zkreslujících signály, s vydatným využitím možností, které skýtá sestřih).

Další podmínkou kvalitní reprodukce je dobré reprodukční zařízení včetně reproduktorových soustav, což je obecně známé. Méně známý je význam správného umístění reproduktorových soustav v poslechové místnosti, význam jejich akustických vlastností a konečně i nesporná úloha hladiny zvuku a její spojitost s konečným vjemem. Hladina hlasitosti signálu při poslechu má odpovídat druhu a charakteru reprodukovaného díla. Přitom ovšem nutné brát také ohled na to, aby akustickým signálem pronikajícím do okolí, zejména sousedních bytů, nebylo degradováno životní prostředí hlukem, kterým tento pro posluchače žádoucí zvuk pro nezúčastněného vlastně je. A může to být mnohdy hluk značně nepříjemnější, než jakýkoli průmyslový hluk, který nenese žádnou záměrnou informaci.

Je známo, že obytné domy ze současné bytové zástavby jsou řešeny tak, že akustický signál o hladině 75 dBA v místnosti v sousedním bytě anebo jiném přilehlém prostoru nemá být rušivý (pokud byla stavba provedena s dostatečnou péčí, je průzvučnost stěn okolo 50 dBA).

Je-li tedy hladina zvuku při reprodukci krátkodobě a pouze ve špičkách 90 dBA, bude v sousedních bytech hluk o hladině 40 až 42 dB, což je mimo dobu nočního klidu ještě na krajní mezi přijatelnosti (nesmí se ovšem jednat o hladinu trvalou!).

V budovách, kde není nebezpečí rušení sousedů hlukem (jde o samostatné domky), lze zvýšit hladinu v místě poslechu až na 94 až 96 dBA (ovšem opět jen krátkodobě). S ohledem na zdraví posluchače nelze doporučit dlouhodobý poslech touto úrovní signálu. Nutno konstatovat, že ne vždy se tato zásada zachovává a to obvykle při poslechu „pop-music", kdy bohužel maximální hladina signálu má téměř trvalý charakter.

Trvá-li posluchač ke své škodě na vysokých hladinách signálu bez ohledu na vlastní zdraví, lze mu doporučit sluchátkový poslech, kdy lze bez obtěžování okolí hlukem dosáhnout hladin zvuku až do 120 dB s elektrickým příkonem okolo 1 VA. V každém případě nutno mít na zřeteli nespornou škodlivost vysokých hladin zvuku, jak na sluch, tak i na celý nervový systém.

Obytná místnost, v níž se má uskutečnit kvalitní poslech reproduktorovými soustavami, má mít objem větší než 40 m³ a dobu dozvuku okolo 0,5 s, takže její dozvuková vzdálenost r_d je asi 0,5 m. Místnost má být vybavena nábytkem tak, aby jím byly její stěny co nejvíce zakryty a tak byl akustický signál v dostatečné vzdálenosti od zářičů dostatečně difúzní. Členitost místnosti ovlivněná nábytkem má příznivý vliv na difuzitu výsledného akustického pole v ní. Je to obdobné jako u starých, po akustické stránce kvalitních koncertních sálů a divadel, u nichž členitost jejich povrchu (lóže, sloupy, sochy apod.) velkou měrou přispívá k jejím dobrým akustickým vlastnostem.

Jak již bylo řečeno, jsou vyzařovací soustavy určené pro reprodukci zvuku řešeny tak, aby měly optimální přenosové vlastnosti při vyzařování do poloprostoru. Pak je s ohledem na činitel směrovosti vzdálenost od jejich ústí, kdy je stejná hladina přímého signálu a signálu difúzního, rovna $r_d\sqrt{Q_s} = 0{,}7$ m. Při citlivosti η_{dB} reproduktorové soustavy je hladina difúzního signálu (při činiteli směrovosti Q_s a příkonu soustavy N [VA]

$$p_{dif,dB} = \eta_{dB} - 20\log r_d - 10\log Q_s + 10\log N \qquad (11.1.),$$

tedy u běžné obytné místnosti a vyzařování do poloprostoru (v oblasti nízkých a středních kmitočtů)

$$p_{dif,dB} = \eta_{dB} + 10\log N + 1{,}5 \quad [\text{dB; VA}] \qquad (11.1a)$$

Pro dosažení hladiny $p_{dif,dB}$ je za stejných podmínek nutný příkon

$$N = 10^{\frac{1}{10}(p_{dif,dB} - \eta_{dB} + 20\log r_d + 10\log Q_s)} \qquad (11.2)$$

čili u běžné místnosti o $r_d = 0{,}5$ m

$$N = 10^{\frac{1}{10}(p_{dif,dB} - \eta_{dB} - 1{,}5)}\ \text{VA} \qquad (11.2a).$$

Při současné činnosti obou soustav je ovšem příkon pro napájení každé z nich poloviční.

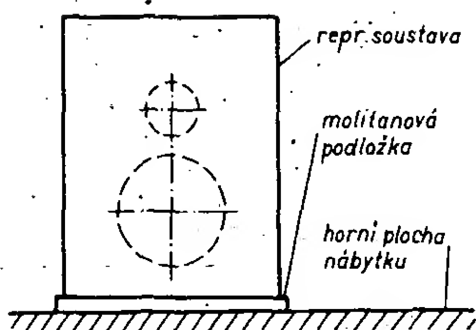
Z uvedeného je patrné, že potřebné příkony jsou značně menší než výstupní výkony běžných stereofonních zesilovačů, které jsou z tohoto hlediska značně předimenzované.

Jako příklad uvažujme reproduktorovou soustavu o citlivosti 86 dB/$\sqrt{\text{VA}}$/m (což je hodnota dosti nízká). Pro dosažení úrovně signálu v místnosti (rozumí se v difúzním akustickém poli) 94 dB je potřebný celkový příkon

$$N = 10^{\frac{1}{10}(94 - 86 - 1{,}5)} = 4{,}5\ \text{VA},$$

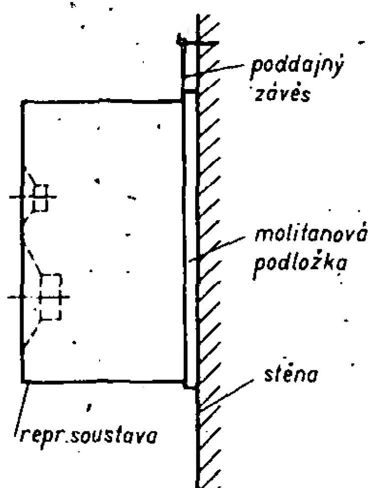
tedy 2,25 VA pro kanál. (Při využití plného výkonu stereofonního zesilovače 2 × × 20 VA by byla hladina akustického tlaku v místnosti 103,5 dB, což je ovšem hladina neúnosně vysoká.) Hladina 94 dB je dosažena v libovolném místě místnosti, ve vzdálenosti větší než $r_d\sqrt{Q_s} = \sqrt{2}r_d$ (0,7 m) od ústí soustav, pokud se neprojeví vliv stojatých vln v prostoru. Stojaté akustické vlny vznikající při vybuzení uzavřeného prostoru sinusovým signálem mohou střední hladinu hlasitosti v určitých místech prostoru značně zvýšit.

Aby reproduktorové soustavy vyzařovaly žádoucím způsobem do poloprostoru, je nutno je umístit tak, aby svou zadní stěnou přiléhaly ke stěně místnosti. V krajním případě je lze na stěnu místnosti přímo zavěsit. Nutno však omezit na nejzazší mez přímý přenos vibrací reproduktorové soustavy na zdi, případně podlahu poslechové místnosti, kterými se pak mohou šířit po konstrukci budovy a způsobovat v okolních bytech nežádoucí hluk. Je účelné, aby vyzařovací jednotky byly odděleny od okolí poddajnými podložkami. Tak, spočívá-li soustava svým dnem na nábytku anebo podlaze, je účelné, je-li opatřena velmi poddajnými nožičkami, nebo postavena na podložku z poddajného materiálu, například měkkého pěnového molitanu (obr. 11.1). Je-li soustava



Obr 11.1. Poddajné uložení reproduktorové soustavy na vodorovnou plochu nábytku

zavěšena na stěně, je nutno mezi její zadní stěnu a zeď umístit podobnou vrstvu poddajného materiálu, přičemž vlastní závěs má být rovněž poddajný (například pryžový) (obr. 11.2). Podložka mezi pev-



Obr. 11.2. Zavěšení reproduktorové soustavy na zeď

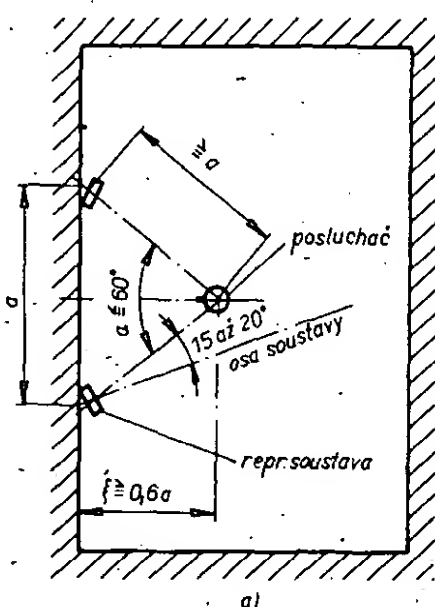
ným tělesem a soustavou nemusí být ovšem kompaktní – postačí jen několik distančních podložek menších rozměrů.

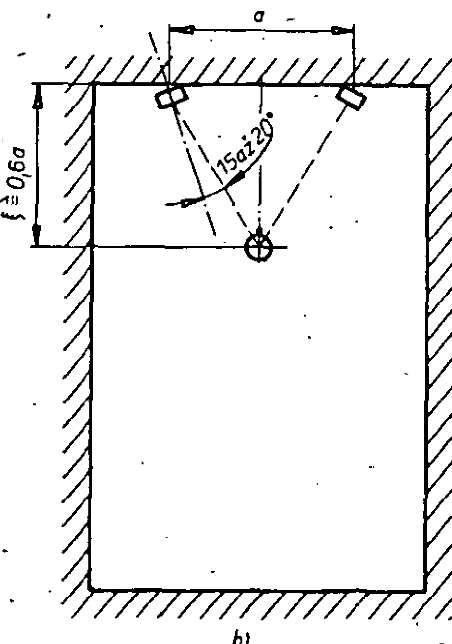
Poddajné podložky omezí jednak přenos vibrací na stěny, případně podlahu místnosti, jednak zmenší možnost vzniku mechanické vazby mezi reproduktorovými soustavami a ostatním zařízením, zejména gramofonem (omezí se tak nebezpečí vzniku zpětné vazby anebo zvlnění výsledné kmitočtové charakteristiky, ovlivněné touto mechanickou vazbou).

Vyzařovací jednotky je třeba umístit tak, aby se jejich vyzařovací podmínky navzájem co nejméně lišily. Vyhovující je jejich uspořádání podle obr. 11.3, kdy jsou umístěny u kratší (*a*) anebo u delší stěny (*b*) místnosti. Je-li délka delší stěny místnosti větší než 4 m, lze připustit mírně nesymetrické uspořádání soustav, ne však více než o 1 m od středu stěny. Vzájemná vzdálenost soustav má být v rozmezí 1,5 až 2,5 m a soustavy s posluchačem mají tvořit, jak je známo, rovnostranný, případně rovnoramenný trojúhelník, v druhém případě o vrcholovém úhlu minimálně 45°. Soustavy mají být situovány tak, aby jejich referenční body byly ve výši uší posluchače a podle možnosti natočeny tak, aby úhel spojnice jejich referenčního bodu s posluchačem a referenčních os nebyl větší než 15 až 20°.

U uspořádání podle obr. 11.3 může být soustava vestavěna do police nábytku, případně nábytkové stěny.

Jiné možné uspořádání reproduktorových soustav v poslechové místnosti je na obr. 11.4, kde jsou zářiče umístěny u na-





Obr. 11.3. Umístění vyzařovacích soustav stereofonního zařízení v poslechové místnosti u jedné stěny

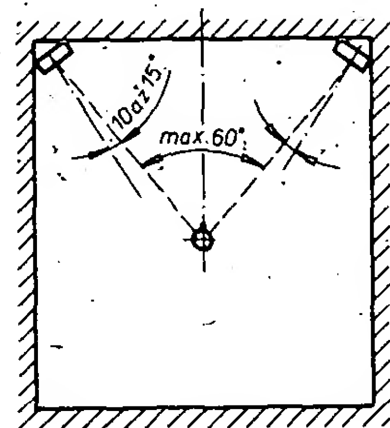
Obr. 11.4. Umístění vyzařovacích soustav stereofonních zařízení u dvou na sebe kolmých stěn

vzájem na sebe kolmých stěn. Toto uspořádání má tu přednost, že se jím omezí vznik stojatých vln v místnosti na minimální možnou míru, což zlepší výslednou difuzitu pole.

Je však výhodné i uspořádání rohové podle obr. 11.5. V tomto případě je třeba mít na zřeteli, že se proti předchozím případům zdůrazňují signály o velmi nízkých kmitočtech a to asi o 3 dB, pokud jde o hladinu difúzního signálu. Hladina přímého signálu se ovšem zvýší o 6 dB ve srovnání s uspořádáním soustav umístěných u zdi.

Tím byly ve stručnosti probrány hlavní podmínky pro dosažení optimálního poslechu reprodukovaného akustického signálu, které je vhodné respektovat.

Vzhledem k omezenému rozsahu nebylo možno uvést některé nové poznatky týkající se dalších možných zdokonalení bass-reflexových zářičů a zejména pak nových možností, jak zmenšit rozměry vyzařovacích jednotek a zlepšit přenosové vlastnosti zařízení aplikací dalšího zářiče, přenášejícího pouze signály o nejnižších kmitočtech (pod 80 Hz).



Obr. 11.5. Umístění vyzařovacích soustav stereofonního zařízení v rozích místnosti

Literatura

[1] *Merhaut a kol.*: Příručka elektroakustiky. Praha: SNTL 1964.

[2] *Merhaut, J.*: Teoretické základy elektroakustiky. Praha: ACADEMIA 1976.

[3] *Smetana, C. a kol.*: Praktická elektroakustika. Praha: 1981.

[4] *Olson, H.*: Acoustical Engineering. D. Van Nostrand Comp.: N. York, London, Toronto 1964.

[5] *Lachlan, Mc.*: Loud Speakers. Dover Publications, Inc.: New York, 1960.

[6] *Beranek, L.*: Acoustic Measurements. J. Wiley & Sons, Inc.: New York, 1950.

[7] *Boleslav, A.*: Nízkofrekvenční a elektroakustická měření. Praha: SNTL 1961.

[8] *Boleslav, A.*: Reproduktory a ozvučnice. Praha: SNTL 1960.

[9] *Faktor, Tischer a kol.*: Magneticky měkké materiály ve sdělovací technice. Praha: SNTL 1961.

[10] *Kolmer, F.*: Prostorová akustika. Praha: SNTL 1980.

[11] *Salava, T.*: Elektroakustická měření. Praha: SNTL 1979.

[12] *Small, R. H.*: Vented-Box Loudspeaker Systems. JAES, říjen 1973.

[13] *Small, R. H.*: Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis. JAES, vol. 20, červen 1972.

[14] *Small, R. H.*: Closed-Box Loudspeaker Systems. JAES, vol. 20, prosinec 1972.

[15] *Thiele, A. N.*: Loudspeaker in Vented Boxes. Proc. IEEE Australia, vol. 22, květen 1961.

[16] ČSN 36 8261: Reproduktory (1967).

[17] ČSN 36 8262: Přímovyzařující elektrodynamické reproduktory (1967).

[18] ČSN 36 8265: Reproduktorové soustavy (1971).

[19] ČSN 36 7006: Měření akustických charakteristik přístrojů a zařízení s akustickým výstupem (1972).

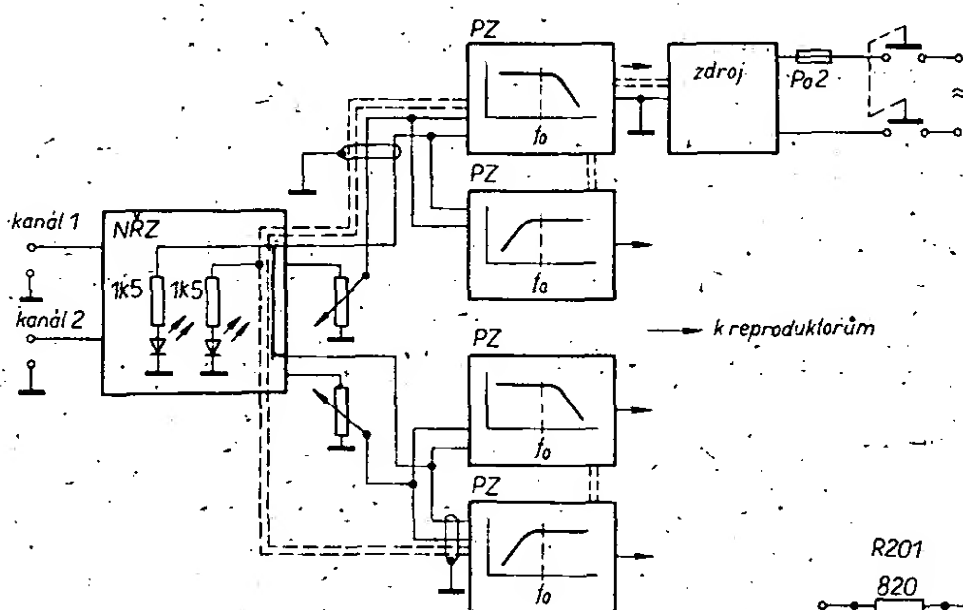
AKTIVNÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA

Ing. Jiří Mrnuštík

V poslední době se hodně hovoří o tzv. aktivních reproduktorových soustavách. Jde o systém s výkonovými zesilovači vestavěnými přímo v reproduktorových skříních a řízenými jednoduchým napěťovým předzesilovačem. O takovou konstrukci jsem se pokusil a položil jsem si následující podmínky:

- maximální jednoduchost,
- minimální stavební náklady,
- dobrou reprodukovatelnost,
- tuzemské součástky,
- dobré parametry.

Pro stavbu soustavy lze z tuzemské součástkové základny vybrat dva reproduktory: ARN 6604 a ARV 3604. Tato kombinace dovoluje konstrukci soustavy



Obr. 1. Blokové schéma zapojení

s příkonem 20 W, s dělicím kmitočtem asi 3000 Hz a s kmitočtovým rozsahem 40 až 20 000 Hz. Dvoupásmová soustava pro tento účel plně vyhovuje a je přitom relativně jednoduchá a levná.

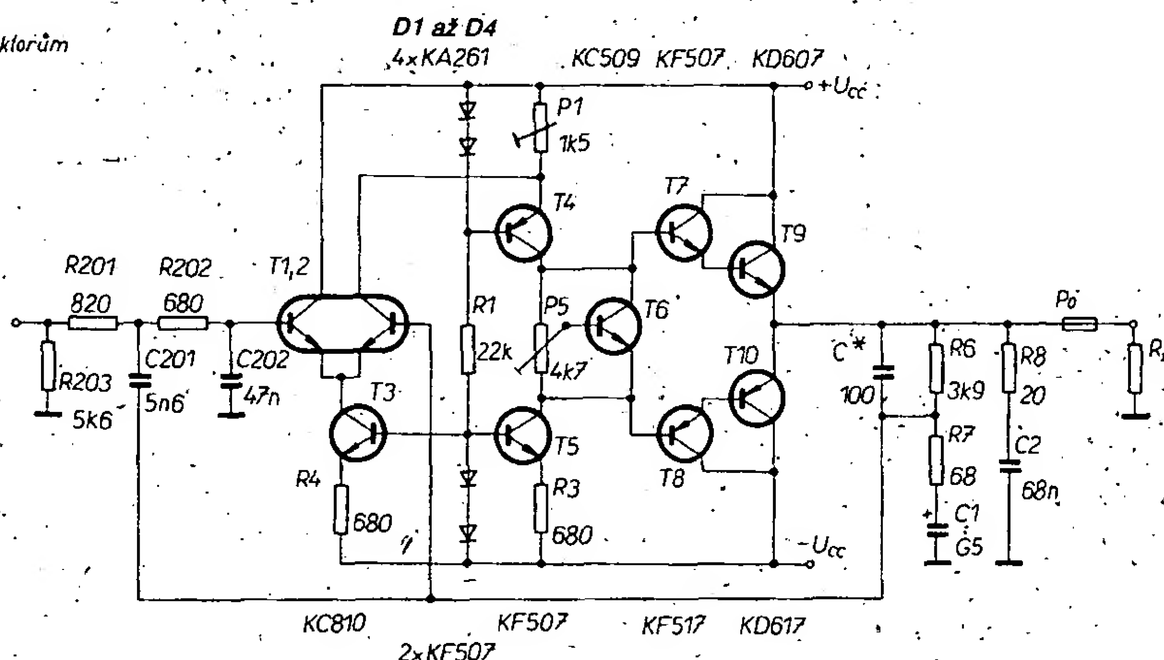
V aktivní reproduktorové soustavě jsou pasívní výhybky nahraženy zesilovači s kmitočtově závislým ziskem, které vstupní signál rozdělí na dvě pásma s dělicím kmitočtem 3000 Hz. To ovšem předpokládá dělit signál na nízké napěťové úrovni a výkonové zesilovače pro jednotlivé reproduktory navrhnout jako kmitočtově závislé.

Podle obr. 1 dostávají výkonové zesilovače signál z napěťového předzesilovače. Napáječ jsem umístil do jedné z obou reproduktorových skříní. Pro rozvod signálu jsem použil čtyřpramenný stíněný kabel; dva dráty k přenosu signálu a dva k napájení (zemní přívod vždy samostatný).

Na obr. 2 je zapojení výkonového zesilovače. Tranzistory T1 a T2 s proudovým zdrojem (T3, R4, D1 a D2) v emitorech tvoří rozdílový vstupní zesilovač, který řídí proudový zdroj tvořený tranzistorem T4, trimrem P2 a diodami D3 a D4. Proudový zdroj s tranzistorem T5 je k němu komplementární. Při nulové úrovni vstupního signálu jsou proudy oběma zdroji stejné a úbytek napětí na trimru P5 je symetricky rozložen kolem nuly. Tímto trimrem lze nastavit vhodné předpětí pro budicí a koncové tranzistory. Tranzistory T9 a T10 tvoří komplementární koncový stupeň. Změnou odporu R6 a R7 lze nastavit velikost zpětné vazby a tím i zesílení celého zesilovače. Kapacita C1 zaručuje stejnosměrné zesílení rovné 1 a je volena tak, aby se ani při nižších kmitočtech nezmenšoval zisk. Napájení je symetrické, což umožňuje vypustit vazební kondenzátory mezi zesilovači a zátěží. Kondenzátor C^* zabraňuje případnému rozkmitání zesilovače.

Deska s plošnými spoji výkonových zesilovačů je na obr. 3. Tranzistory T6, T9 a T10 jsou umístěny na jednom chladiči, což zajišťuje teplotní stabilitu.

Při osazení desky s plošnými spoji je vhodné použít předem zkontrolované a proměřené součástky. Ušetří nám to mnoho času při hledání chyby. Nejprve připojíme T4, P2, D3, D4 a oba proudové zdroje s T3 a T5. Po kontrole jejich správné funkce připojíme T1 a T2 a uzemníme jejich báze. Pak trimrem P2 nastavíme stejné kolektorové proudy T4 a T5. Připájíme báze T1 a T2 a připojíme ostatní součástky. Na osciloskopu (nebo i sluchem) nastavíme pracovní bod tak, aby signál nebyl zkreslen a zároveň aby klidový proud nepřesáhl 60 mA. Trimrem P2 pak nastavíme symetrii výstupního signálu při velkém rozkmitu vstupního napětí. Zesilovač je proti zkratu na výstupu chráněn pojistkou Po. Na obr. 2 je výkonový zesilovač zapojen jako dolní propust. Horní propust z něj dostaneme prostou záměnou R201, R202, R203, C201, C202 za C101, C102, R103, R101, R102.

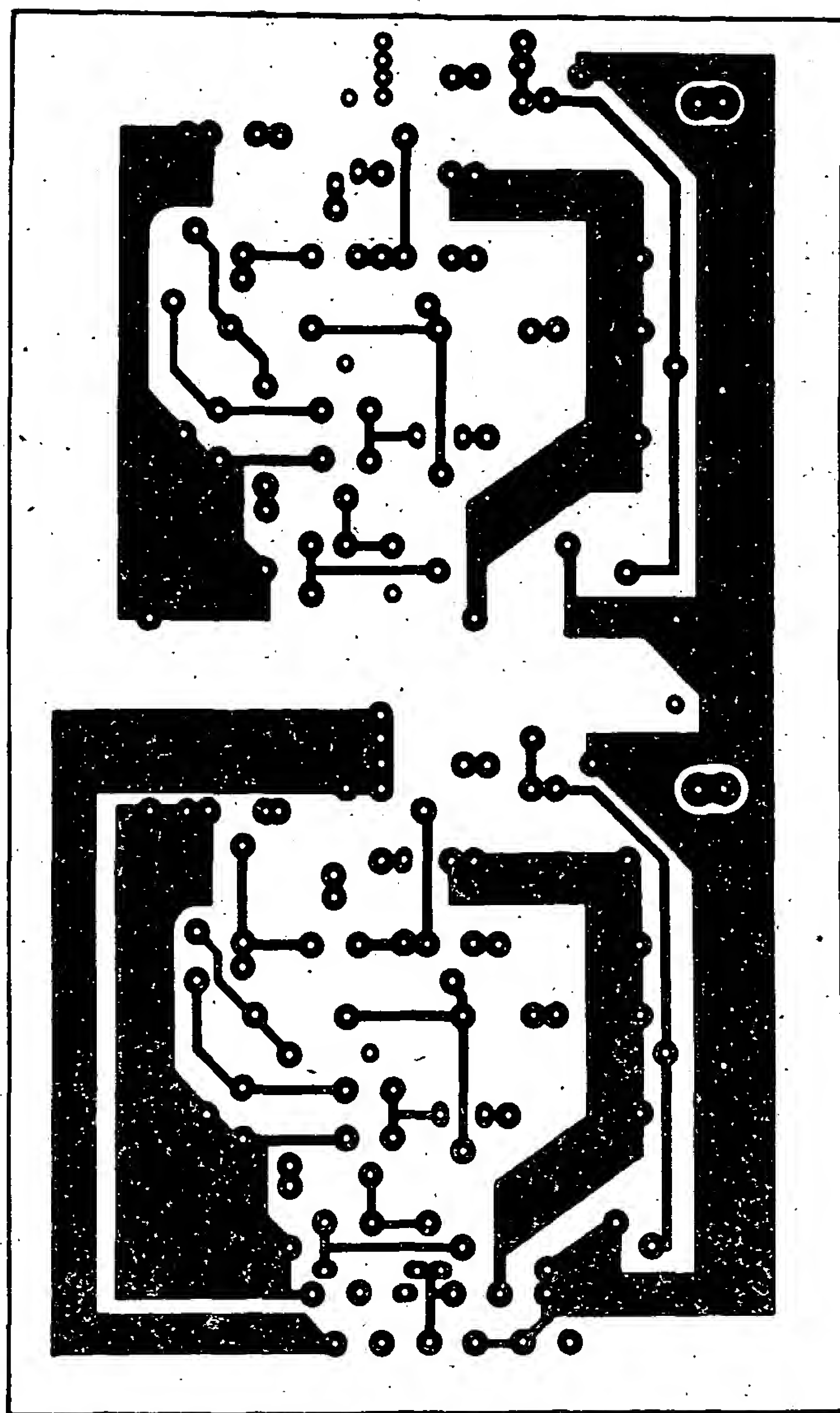


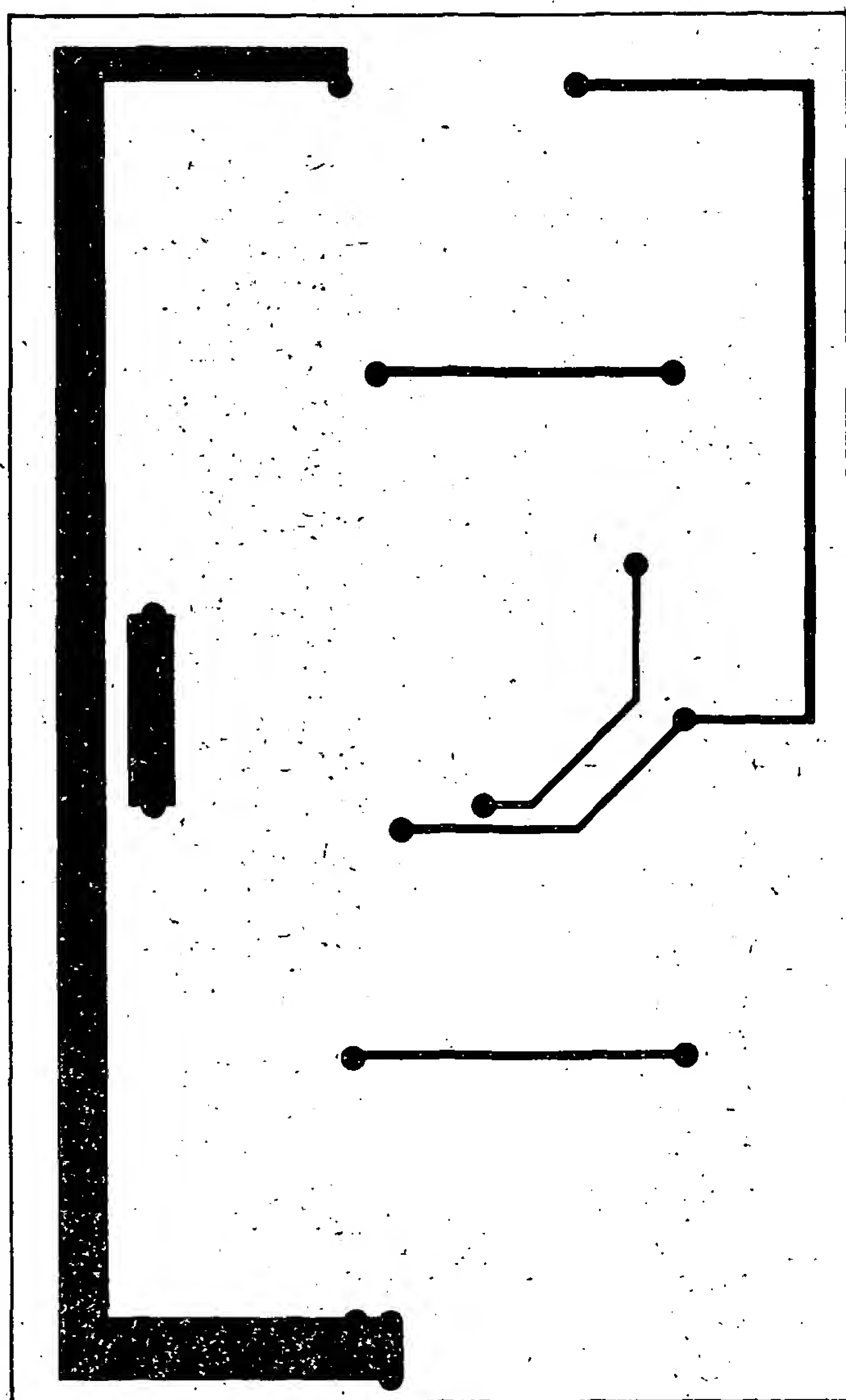
Obr. 2. Zapojení výkonového zesilovače

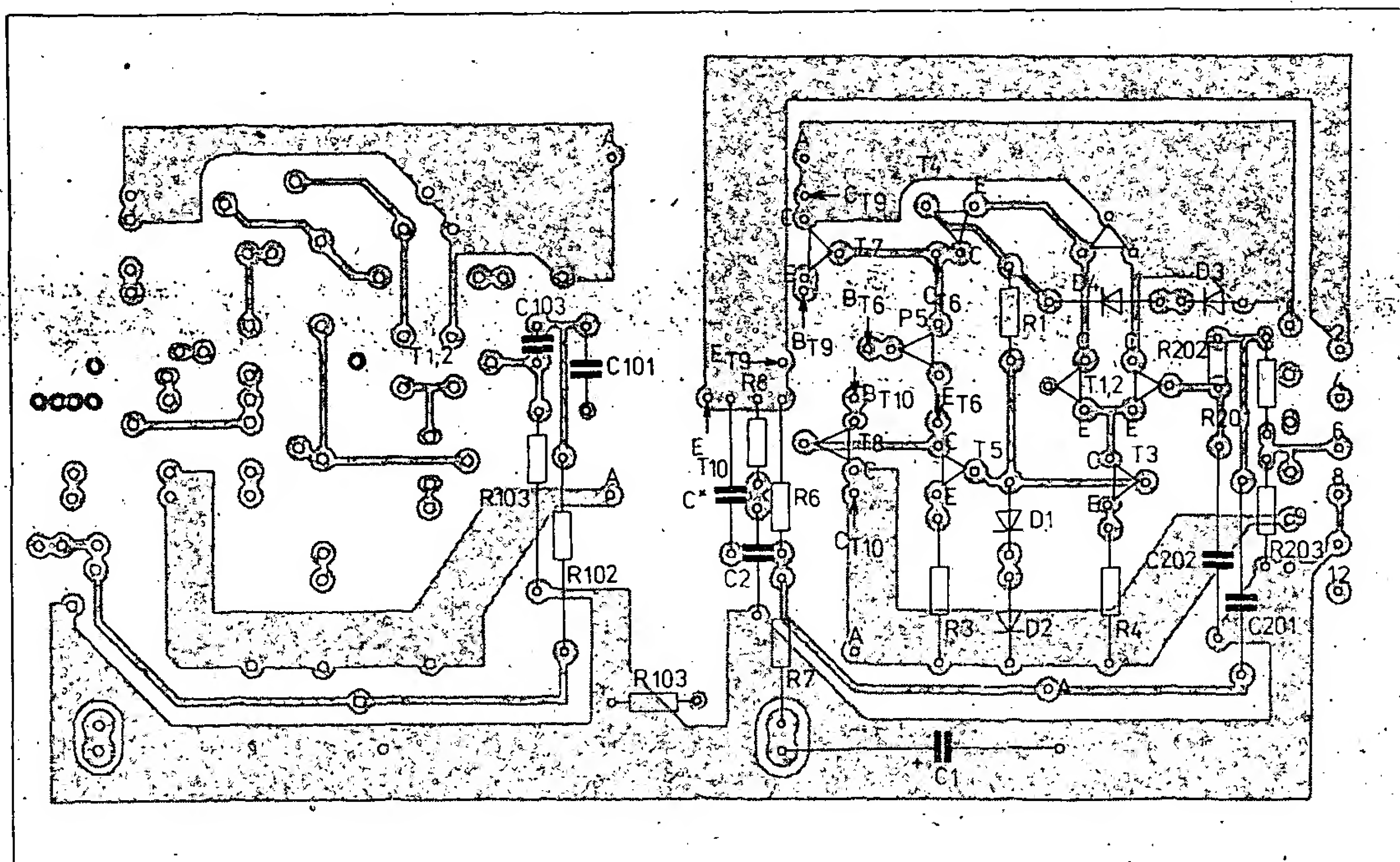
Zapojení řídicího předzesilovače je na obr. 4. Vstup tvoří dvoustupňový zesilovač (T1 a T2) s kmitočtově závislou zpětnou vazbou (R8, R9, C5 a C6), upravující zesílení na průběh potřebný pro magnetodynamickou přenosku. Za ním následuje dělič napětí (R13 a R14) s oddělovacím kondenzátorem C8 a pasívní korekční člen. Ztráty v pasívních korekcích jsou kompenzovány jednotranzistorovým zesilovačem se společným emitorem.

Žádné pracovní body není třeba nastavit. Jsou-li použité součástky v pořádku,

Obr. 4. Zapojení řídicího předzesilovače (P5 a P5' musí být zapojeny „proti sobě")







Obr. 3. Deska s plošnými spoji S201

Obr. 5. Deska s plošnými spoji S202

Seznam součástek

Řídicí zesilovač (jeden kanál)

Rezistory (TR 212)

R1	47 kΩ
R2	0,22 MΩ
R3	12 kΩ
R4	0,47 MΩ
R5	3,3 kΩ
R6	560 Ω
R7	1,5 kΩ
R8	0,68 MΩ
R9	47 kΩ
R10	18 kΩ
R11	5,6 kΩ
R12	1,2 kΩ
R13	330 Ω
R14	5,6 kΩ
R15	4,7 kΩ
R16	47 kΩ
R17	6,8 kΩ
R18	4,7 kΩ
R19	22 kΩ
R20	4,7 kΩ
R21	0,22 MΩ
R22	27 kΩ
R23	220 Ω

Kondenzátory

C1	10 μF, TE 981
C2	100 pF, ker.
C3	10 μF, TE 986
C4	50 μF, TE 004
C5	5,6 nF, ker.
C6	1,8 nF, ker.
C7	20 μF, TE 984
C8	5 μF, TE 984
C9	1,5 nF, ker.
C10	47 nF, ker.
C11	0,33 μF, TC 180
C13	1,5 nF, ker.
C14	2 μF, TE 986
C15	500 μF, TE 986
C16	500 μF, TE 986
C17	10 μF, TE 986

Potenciometry

P1, P2, P3, P5	0,1 MΩ/N (tandemový)
P4	50 kΩ/G (tandemový)

Polovodičové součástky

T1 až T3	KC509
D1, D2	LQ100

Výkonový zesilovač (jeden kanál)

Rezistory (TR 212)

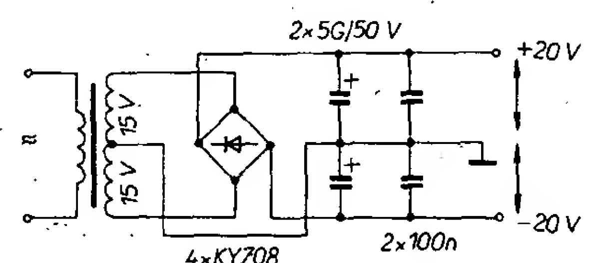
R1	22 kΩ
P2	1,5 kΩ, TP 011
R3	680 Ω
R4	680 Ω
P5	4,7 kΩ, TP 011
R6	3,9 kΩ (5 %)
R7	68 Ω (5 %)
R8	20 Ω
R103	5,6 kΩ, (5 %)
R101	2,2 kΩ, (5 %)
R102	33 kΩ (5 %)
R201	820 Ω (5 %)
R202	680 Ω (5 %)
R203	5,6 kΩ

Kondenzátory

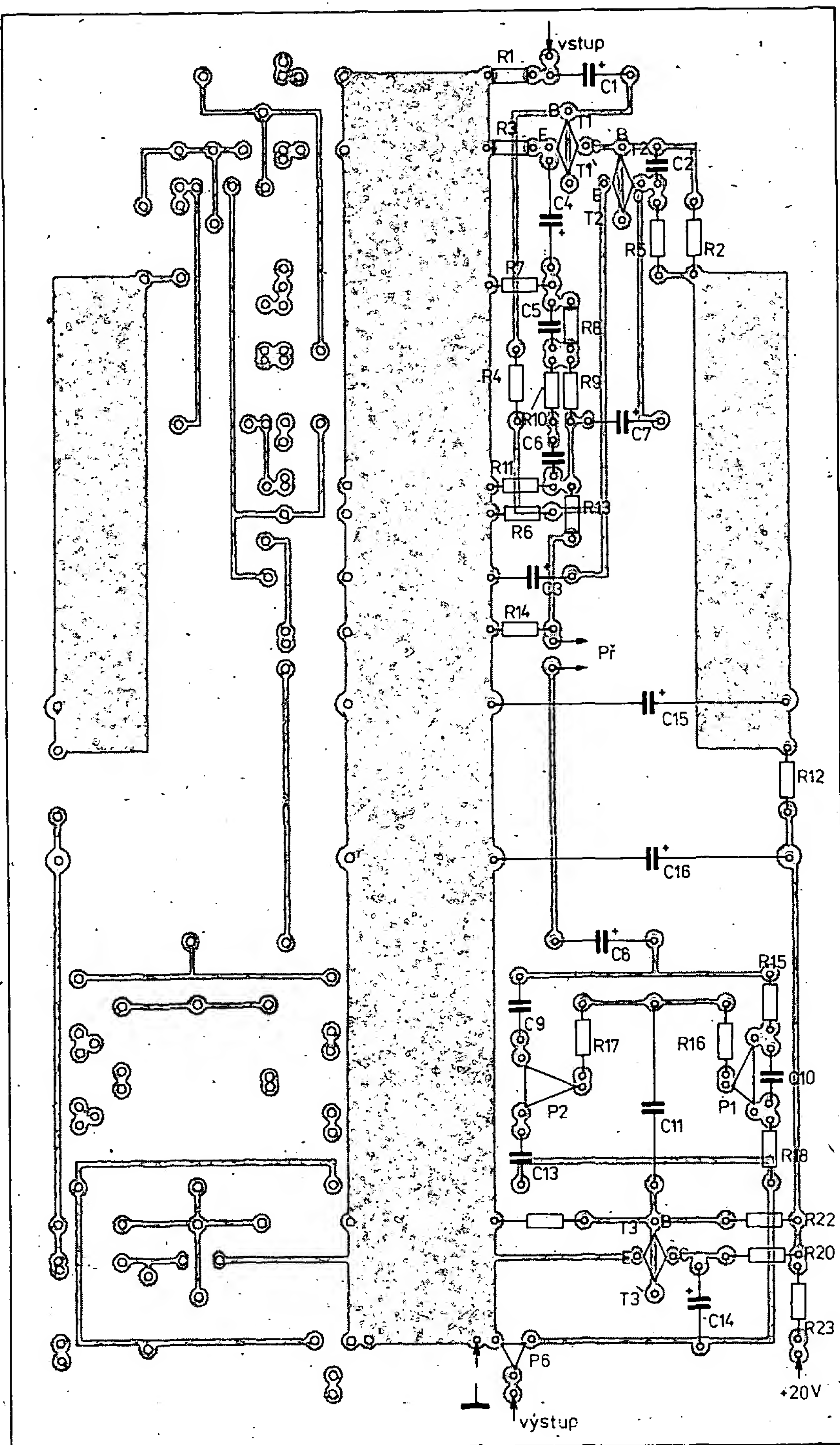
C1	500 μF, TE 986
C2	68 nF, ker.
C*	100 pF, ker.
C101	5,6 nF (10 %)
C102	22 nF (10 %)
C201	5,6 nF (10 %)
C202	47 nF (10 %)

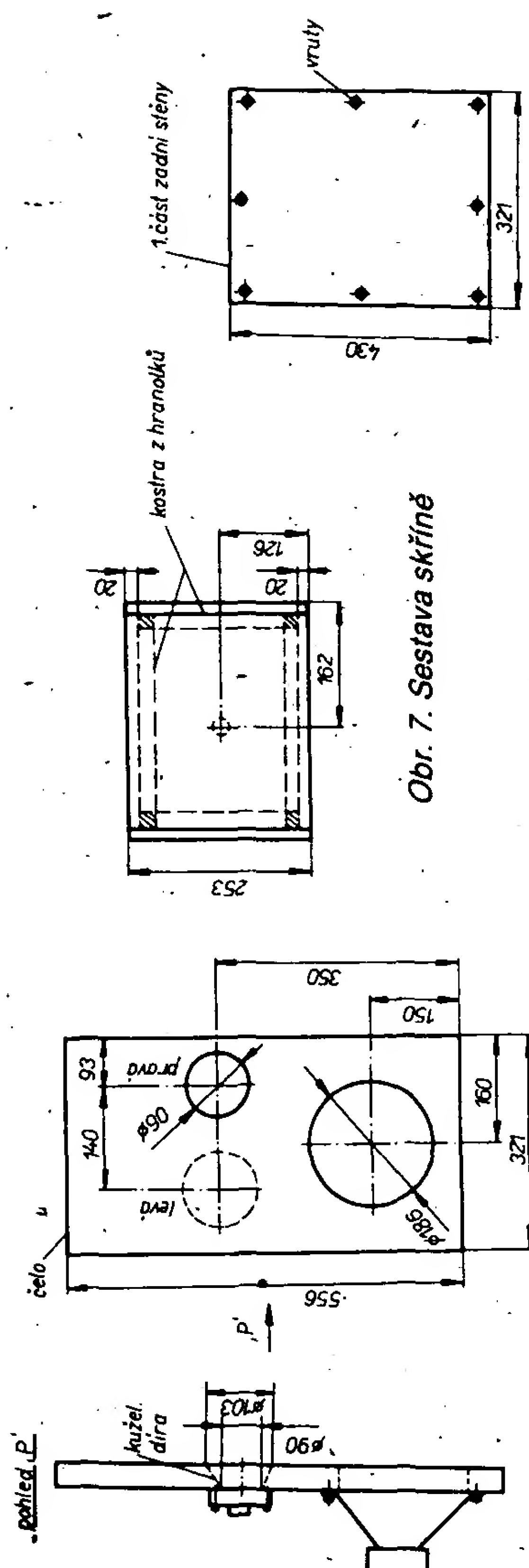
Polovodičové součástky

T1, T2	KC810
T3, T5, T7	KF507
T4, T8	KF517
T6	KC509
T9	KD606
T10	KD617
D1 až D4	KA261

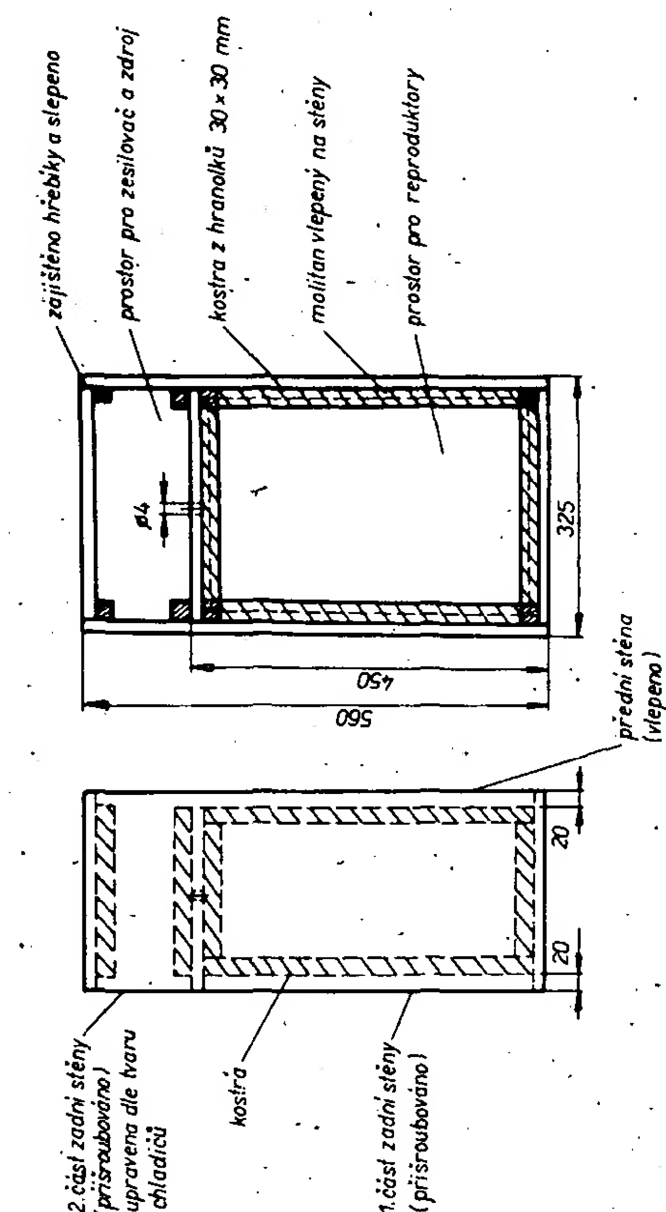


Obr. 6. Zapojení zdroje



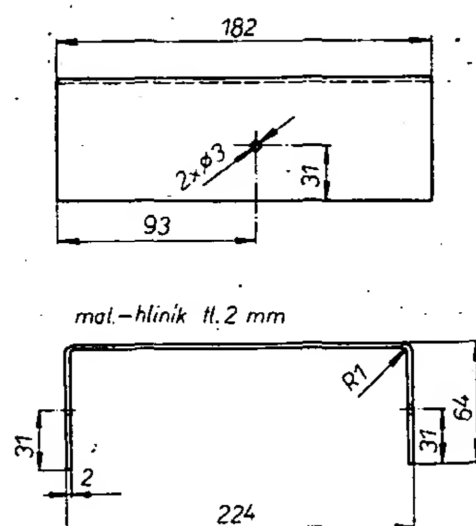


Obr. 7. Sestava skříně

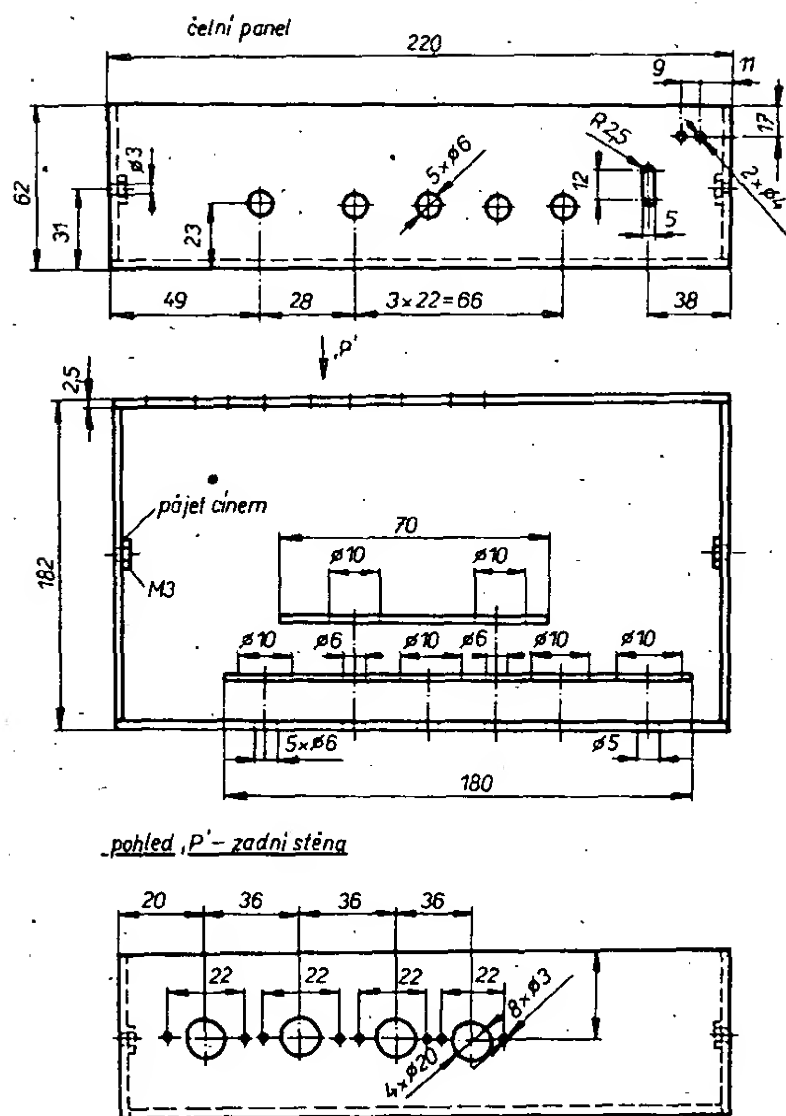


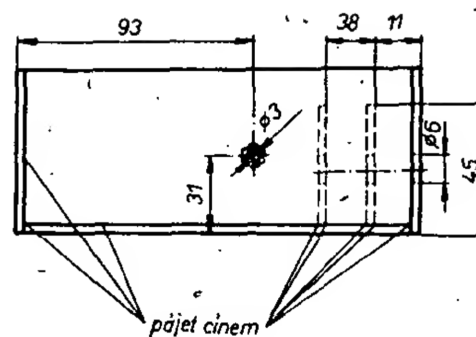
bude zesilovač pracovat na první zapojení. Připomínám, že obdobných konstrukcí bylo již s malými obměnami uveřejněno mnoho a že na nich, aniž by to bylo na úkor jejich jednoduchosti, nelze příliš změnit. Podle potřeby lze do zesilovače přivádět signál ze dvou přepínatelných vstupů. Druhý vstup je univerzální a potenciómetrem P3 lze řídit jeho citlivost. Deska s plošnými spoji řídicího zesilovače je na obr. 5.

Napájecí napětí výkonových zesilovačů je nestabilizované symetrické ±20 V, potřebný proud do 4 A. Napájecí napětí pro



Obr. 8. Konstrukční provedení krabice zesilovače





Obr. 9. Konstrukční provedení skříňky předzesilovače

řídicí zesilovač je +20 V (obr. 6). Vstup pro magnetodynamickou přenosku má impedanci 47 kΩ, univerzální vstup 220 kΩ. Do zátěže 4 Ω při sinusovém buzení je zesilovač schopen odevzdat v hloubkovém kanálu 20 W, ve výškovém 10 W. Vstupní citlivost při tomto výkonu je na gramofonovém vstupu 4 mV/1 kHz. Při měření výkonu byly výkonové zesilovače zapojeny jako kmitočtově nezávislé. Hloubkové korekce mají rozsah ±15 dB (50 Hz), výškové ±10 dB (15 kHz).

Pro reproduktory ARN 6604 je doporučen objem skříní 30 l. Výškové systémy jsou uzavřené. Do skříní jsem (do odděleného prostoru) vestavěl výkonové zesilovače a napáječ (obr. 7). Výkonový zesilovač je přišroubován k části zadního víka tak, že chladič vyčnívá ven a není v uzavřeném prostoru. Tím je zajištěno dostatečné chlazení výkonových tranzistorů.

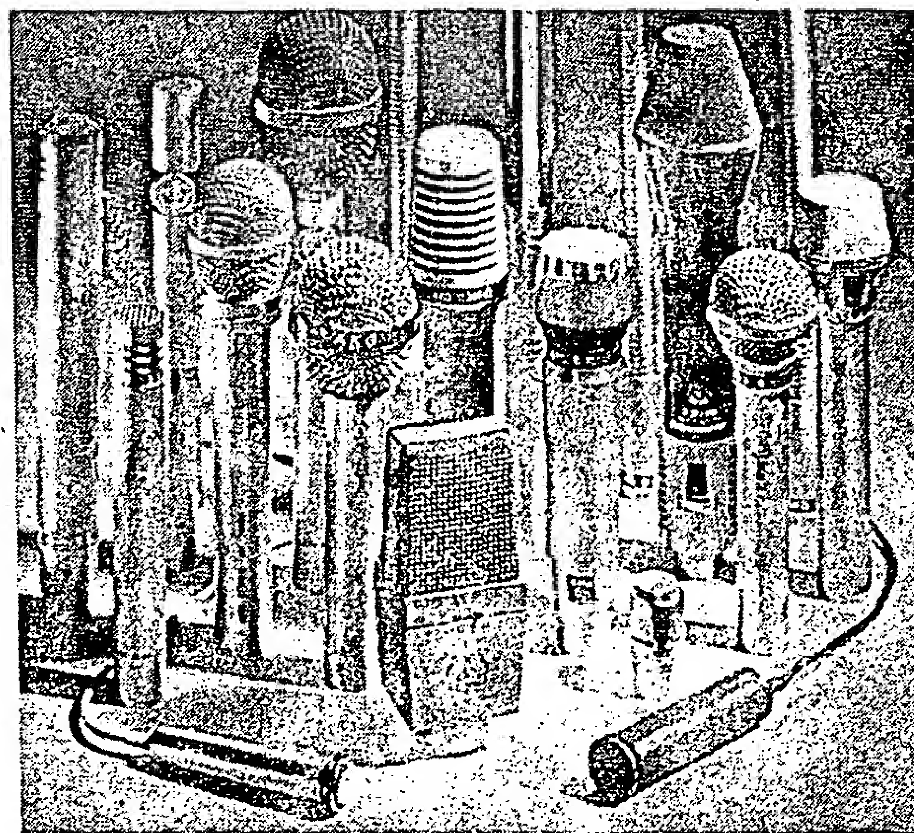
Prostor obsahující reproduktory je uzavřen víkem, utěsněným molitanovými pásky nalepenými po obvodu. Vodiče spojující reproduktory se zesilovači jsou protaženy otvorem vyvrtaným v přepážce mezi reproduktorovou a zesilovačovou částí. Skříň je z 20 mm tlusté dřevotřísky a vnitřní stěny reproduktorového prostoru jsou polepeny 10 mm tlustým molitanem. Zadní víko zesilovačové části je vyříznuto ze sololitu a na skříni, která obsahuje i napáječ, je síťový spínač. Zapnutí soustavy indikují dvě svítivé diody (pro každou napájecí větev jedna) umístěné na panelu řídicího zesilovače. Skříně jsem polepil černou koženkou a čelní stěnu jsem po obroušení natřel černou matnou barvou na školní tabule. Totéž barvou jsem natřel i zadní víka. Konstrukce skříňky pro napěťový předzesilovač vyplývá z obr. 8 a 9.

Na závěr připomínám, že R21 a C17 jsou umístěny přímo na vstupním konektoru a že jednoduchou úpravou lze výkonový zesilovač upravit na kvazikomplementární. Tato úprava si vyžádá jen malou změnu na desce s plošnými spoji.

Následující článek je určen především těm, kteří se aktivně zabývají zvukovou nahrávací technikou – členům i nečlenům svazarmovských hifiklubů a všem „lovcům" zvuku.

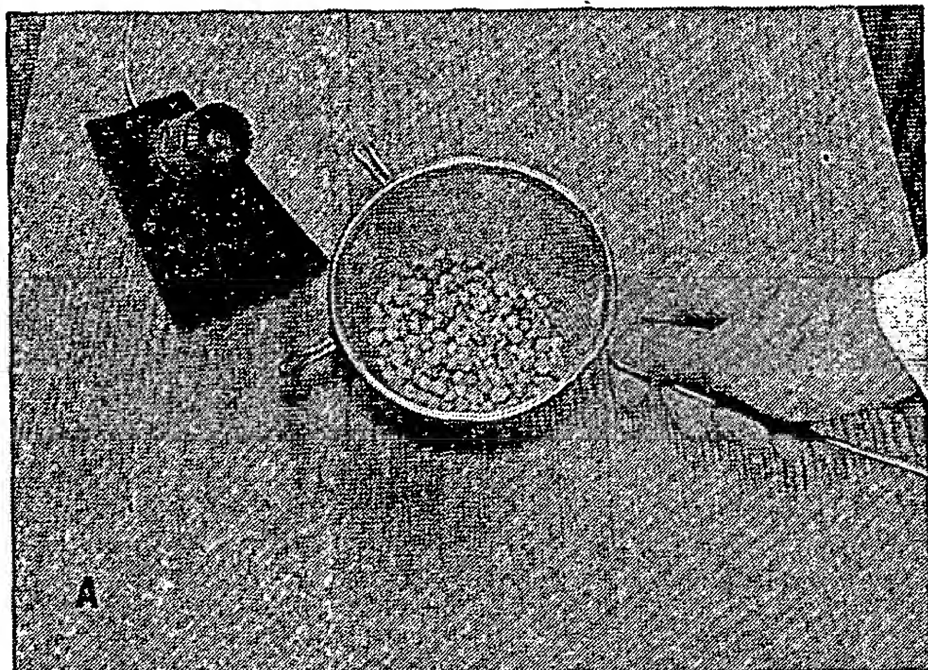
VĚDĚT JAK NA TO

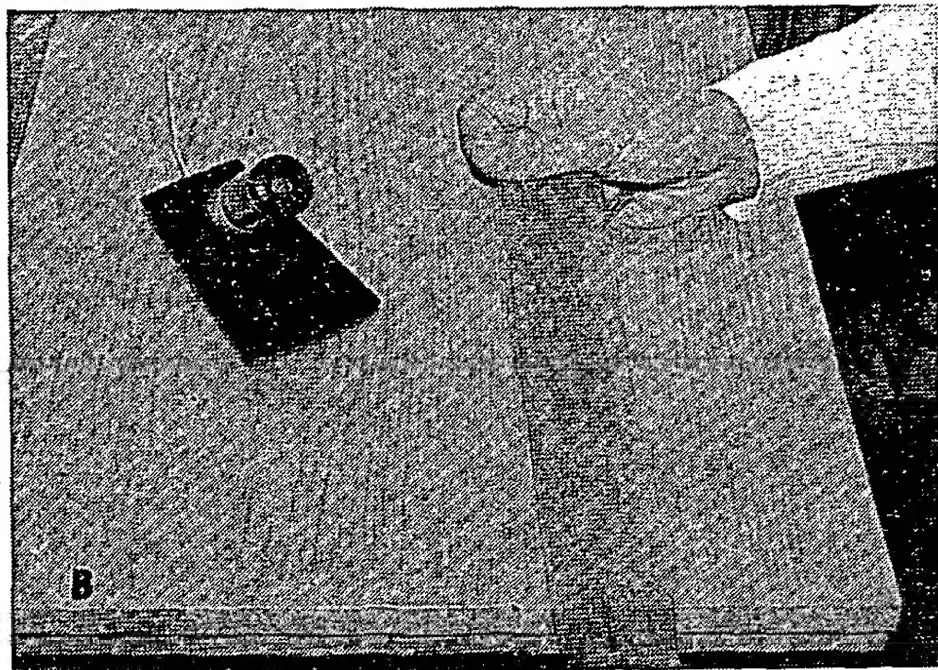
Oldřich ŠMEJKAL



Docela nedávno jsem četl v jednom zahraničním specializovaném časopisu výsledky, podle mého názoru, velmi užitečné ankety. Uskutečnili ji výrobci spotřební elektroniky mezi jejími používateli a případnými zájemci prostřednictvím velkých prodejen a obchodních domů. Odpovědi na otázku: „Jak a k čemu využíváte (budete využívat) magnetofon a videomagnetofon?" byly skoro jednoznačné – k reprodukci záznamů z magnetofonových pásků a kazet nahraných v profesionálních studiích a rozmnožených sériově. Jen asi kolem dvaceti procent dotázaných odpovědělo, že magnetofon a videomagnetofon budou používat i ke studiu, při své profesi nebo – k zájmové fono či videoamatérské činnosti.

Jaké zjištění by podobná anketa přinesla u nás, by bylo jistě velmi zajímavé již proto, že tisíce členů hifiklubů Svazarmu za více jak dvacet let své práce povýšilo zájmovou činnost v elektroakustice a videotechnice na činnost tvůrčí a skoro profesionální. A další tisíce, hlavně mladých začínajících fonoamatérů nebo fonoamatérů neorganizovaných, se snaží své zkušené kolegy nejen dostihnout, ale i překonat.





Pro mladé a začínající fonoamatéry, kinoamatéry i fotoamatéry, kteří podle jednoduchého scénáře vytvářejí s pomocí magnetofonu zvukové reportáže, scénky a hudební či slovní doprovody ke svým filmům a diapozitivům, je určen tento článek. Měl by jim alespoň v kostce poradit, jak dobře, bez obtíží a komplikací zaznamenávat doma na magnetofonový pásek i kazetu různé neobvyklé zvuky.

Jedna z velmi důležitých součástí každého magnetofonu je kvalitní mikrofon. Po ukončení prvního zkušebního záznamu přes mikrofon je proto přirozeně každý fonoamatér zvědav, jak dopadla především nahrávka jeho vlastního hlasu. Mnohý je však velmi zklamán. Vlastní hlas reprodukovaný z magnetofonového pásku mu zní cize, někdy dokonce nesympaticky.

Mikrofon, magnetofon a magnetofonový pásek však za to většinou nemohou. Vězí to v tom, že naši přátelé slyší náš hlas zcela jinak než my sami. Když totiž hovoříme, slyšíme kromě zvuku, který přichází vzduchem do vnitřního ucha, i zvuk tělesný, přenášený na bubínek zevnitř; vibrací kostry lebky, šum dechu apod. Záznam našeho hlasu na pásku proto není špatný, musíme si jen časem zvyknout poslouchat vlastní hlas jako cizí.

Pro vážnou práci v domácím studiu je však i volba správného mikrofonu zcela nezbytná. Vhodný mikrofon spoluurčuje kvalitu zvukového záznamu a jeho reprodukci. Také vyzkoušení odstupu od mikrofonu je pro kvalitní záznam velmi důležité. Proto pro snímky „natočené" pomocí mikrofonu platí několik drobných pokynů, které se vyplatí vždy dodržovat.

HOVOR
Při záznamu mluveného slova si vždy vyhledáme správný odstup od mikrofonu. Jsme-li dále než 30 cm, může se stát, že se na pásku objeví rušivé zvukové odrazy. Že při pohrávání si s mikrofonem vzniknou ty nejpodivnější zvuky, zjistíme velmi brzy sami.

ZPĚV
Zpěváci musí svůj odstup od mikrofonu zvlášť dobře vyzkoušet. Zpívají-li velmi tiše, musí se k mikrofonu přiblížit asi na 15 až 20 cm, jinak je vhodný odstup 30 až 60 cm.

Také postavení mikrofonu při záznamu hudebních nástrojů nejsnadněji vyzkoušíme tak, že mikrofon upevníme třeba na upravený fotostativ. *Následující pravidla* pro vzdálenost mikrofonu při záznamu tónů nejběžnějších hudebních nástrojů nám mohou při naší práci velmi pomoci.

KLAVÍR
Mikrofon umístíme do výšky asi 1,5 až 2 m, nejlépe v poloviční výši, otevřené rezonanční desky do jejího středu.

PIANINO
Mikrofon postavíme do vzdálenosti 1 až 1,5 m od pravého rohu klaviatury a asi 0,5 m nad její úrovní.

AKORDEON
Mikrofon zaměříme přesně na nástroj v odstupu asi 0,7 až 1,2 m. Zde však pozor! Při nahrávce se musíme vyvarovat příjmu rušivých hluků při natahování měchu akordeonu.

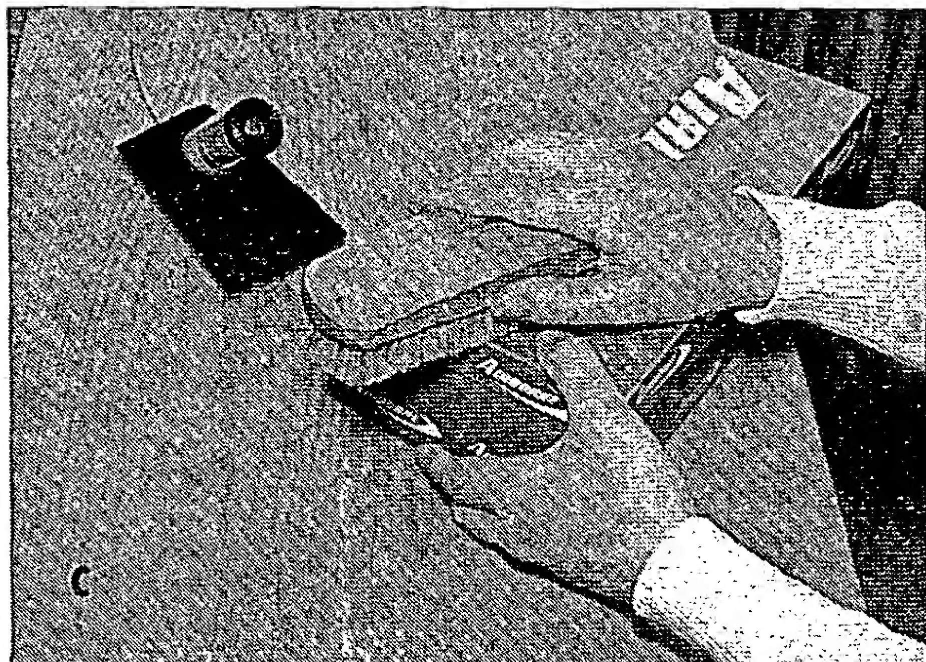
SMYČCOVÉ NÁSTROJE
Nejmenší odstup mikrofonu (0,5 až 1 m) určujeme vždy podle velikosti nástroje a intenzity jeho zvuku. U houslí postavíme mikrofon vedle hmatníku nástroje, před cellem nebo kontrabasem k jeho korpusu.

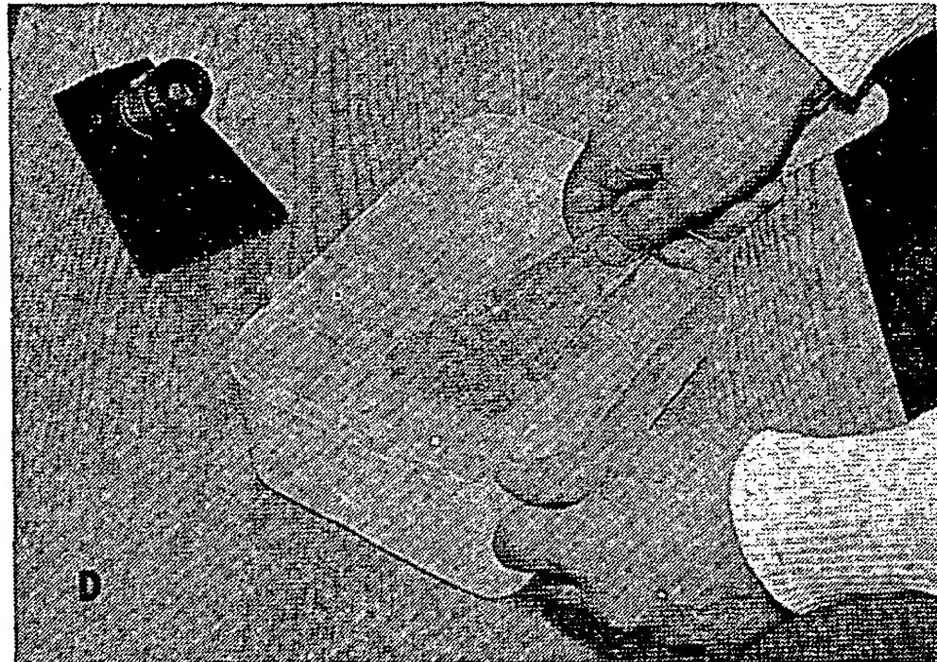
DECHOVÉ NÁSTROJE
U trouby, pozounu atd. postavíme mikrofon přesně 1 m od vyústění nástroje, u dřevěných dechových nástrojů v poněkud menší vzdálenosti.

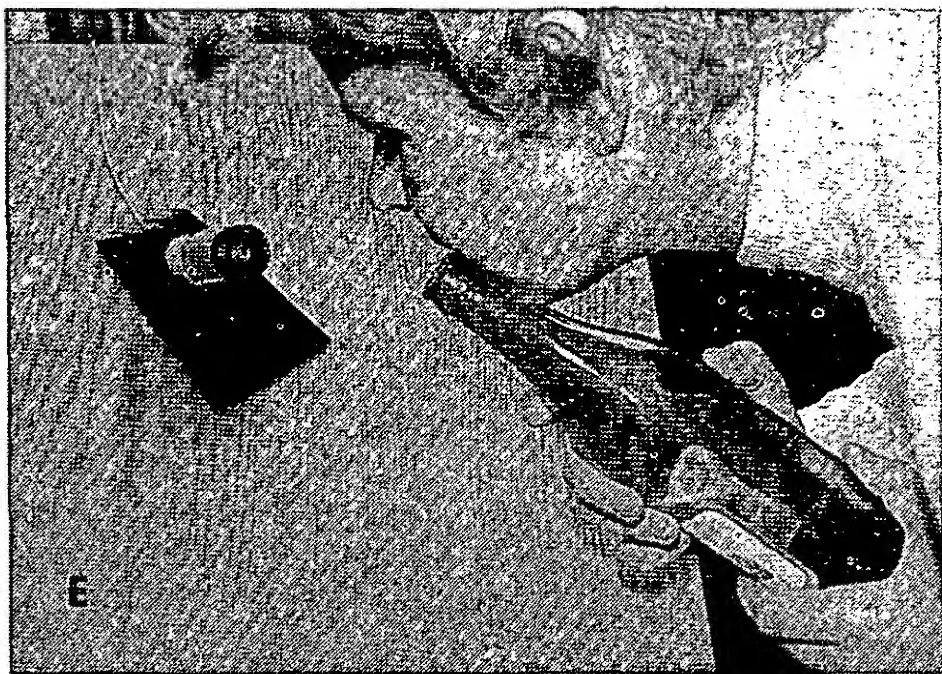
Poloha mikrofonu je tedy vždy důležitá, ať už jde o jakoukoliv nahrávku. Nejvhodnější polohu vyzkoušíme před každým záznamem. Pro práci s mikrofonem si vybereme samozřejmě nejklidnější místnost; kam nedoléhá pouliční hluk; jsou-li v pokoji závěsy, roztáhneme je, aby nevznikly zvukové odrazy. Závěsy však nesmějí ležet na stěně, nýbrž musí být jen volně zavěšeny a zřaseny. Velmi vhodné pro domácí studio jsou i větší hobrové desky přibité na dřevěných rámech. Desky se umístí v několikacentimetrové vzdálenosti od stěn. Také koberce, knihy v nezasklených policových stěnách, čalouněná křesla a pohovky dobře pohlcují zvuk.

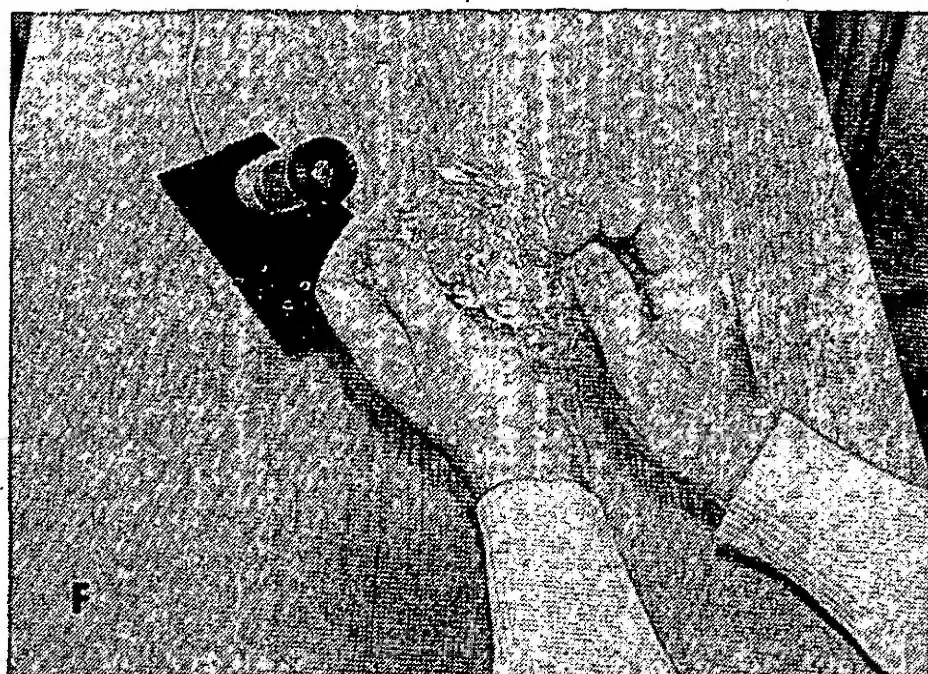
Mnohé zvukové reportáže, scénky i zvukové doprovody amatérských filmů a diapozitivů však často ještě potřebují *doplnit charakteristickými zvuky*. Pro vyvolání dojmu „prostoru" a iluze skutečnosti jsou tyto zvuky nepostradatelné.

Různé uměle vytvořené zvuky lze amatérsky vyrobit přímo před mikrofonem tak dokonale, pohodlně a snadno, že při reprodukci znějí zcela přirozeně. Při vytváření nepostradatelných zvuků je však třeba stále zkoušet, především správnou vzdálenost mezi zdrojem zvuku a mikrofonem. Prostě vždy musíme vědět jak na






E


F

to. Jak se imitované zvuky dají vyrábět v domácím studiu, vysvětlují obrázky.

DÉŠŤ – obr. **A**
Mírný déšť i velký liják se dají doma snadno udělat. Necháme-li před mikrofonem převalovat dvacet až třicet suchých zrnek hrachu po hustém sítu nebo drátěném pletivu, vznikne na pásku zvukový trik počínající několika kapkami deště a končící vytrvalým lijákem. Podle rychlosti převalování hrachu lze vyprodukovat každé množství zvuků. Někteří fonoamatéři však doporučují přidržovat mikrofon nejlépe pod sítem.

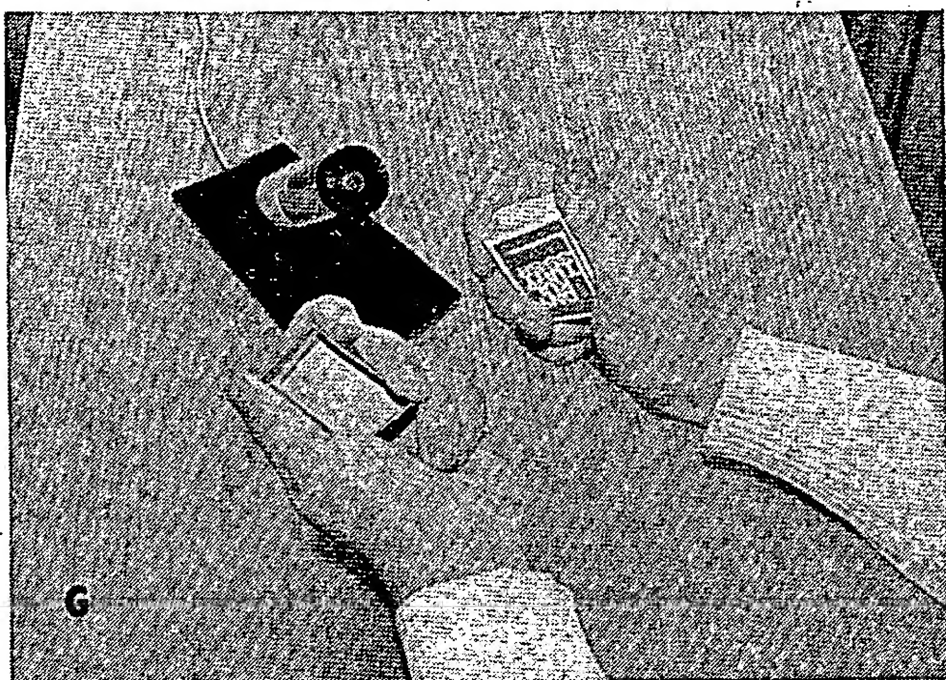
VÁNEK A VICHR – obr. **B**
K výrobě vánku nebo vichru nám postačí stará dámská silonová punčocha nebo kousek hedvábí. Budeme-li pak vypnutou látku přetahovat před mikrofonem přes hranu stolu či desky z měkkého dřeva, vytvoříme umělé zvuky od vánku až po burácející vichr.

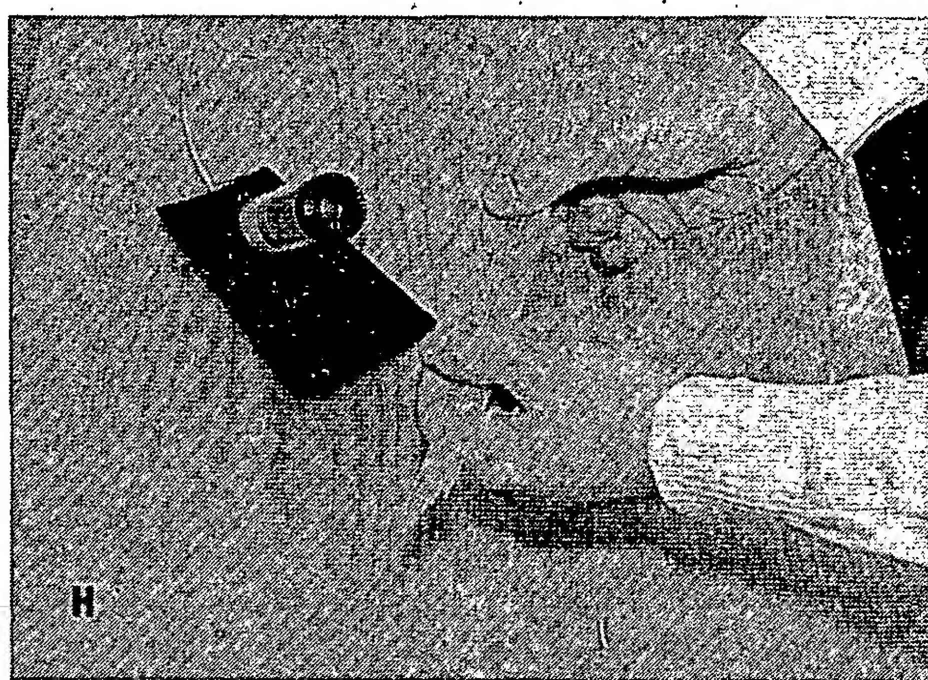
HROM
Také hrom lze amatérsky snadno vytvořit. Zatřeseme-li v dostatečné vzdálenosti od mikrofonu větší deskou tenkého plechu, vznikne hrom jedna radost. I silné fouknutí přímo na mikrofon může být od hromu k nerozeznání. Zkušení fonoamatéři dělají hrom tak, že nahrají na pásek akordy hrané na klavíru, které pak na magnetofonu přehrávají poloviční rychlostí. Musí se to ovšem dobře vyzkoušet.

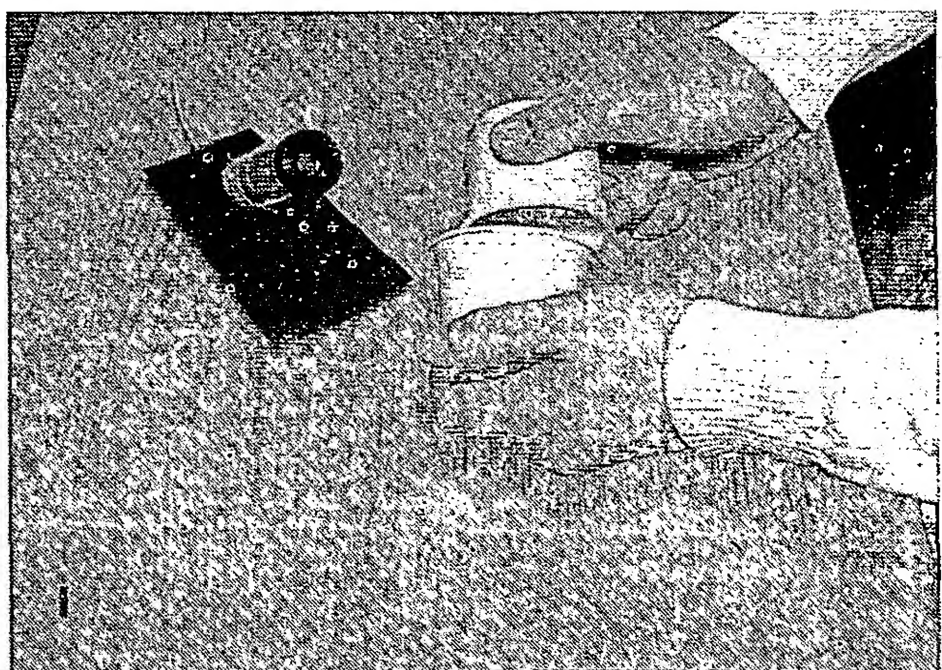
HUKOT MOŘE – obr. **C**
Iluze skutečného hukotu moře se vytvoří pomocí obyčejného kartáče a prázdné krabice od bot. Přejíždíme-li před mikrofonem kartáčem od bot v rytmických intervalech po prázdné krabici získáme hukot (slabší či bouřlivější) vln jezera nebo oceánu. Také přejíždění dvěma kartáči proti sobě po dlouhém kusu plechu vyvolává zvuk vlnění na moři.

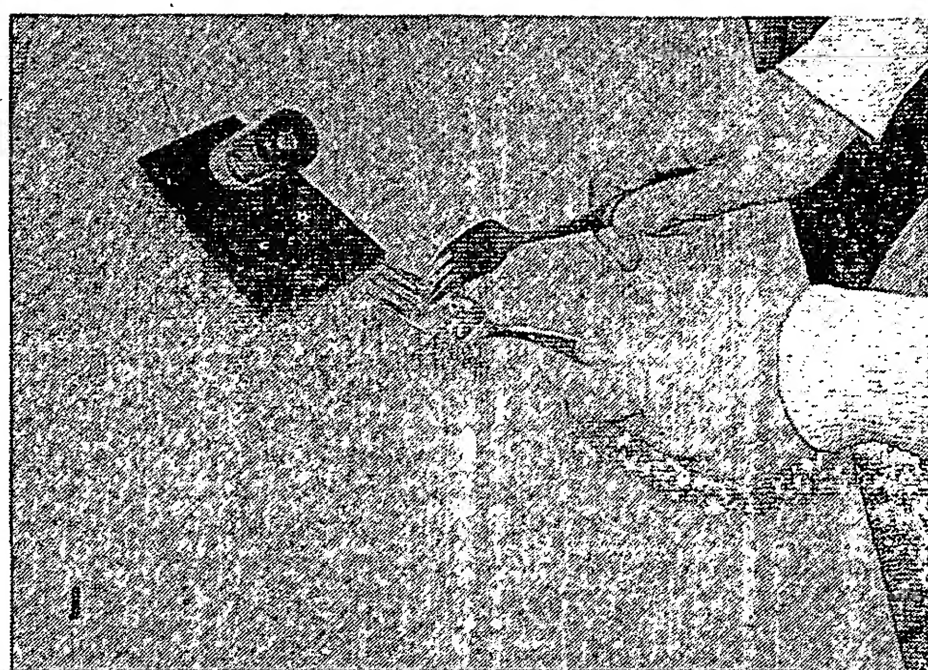
VLNY – obr. **D**
K výrobě zcela „přirozených" vln nám docela postačí nádoba z plastické hmoty a obyčejná voda z vodovodu. Při míchání několika litrů vody stěrkou na těsto sem a tam, nebo pohybem ruky tak, aby voda lehce šplouchala na stěny nádoby, vznikne věrný zvuk úderů vln o břeh nebo hráz.

JÍZDA NA PRAMICI
S dvěma prkénky a dveřmi se dá udělat další domácí kouzlo. Veslujeme-li dvěma prkénky ve vodě a ve stejném rytmu vrzáme dveřmi, vyprodukujeme nádhernou projížďku na pramici.

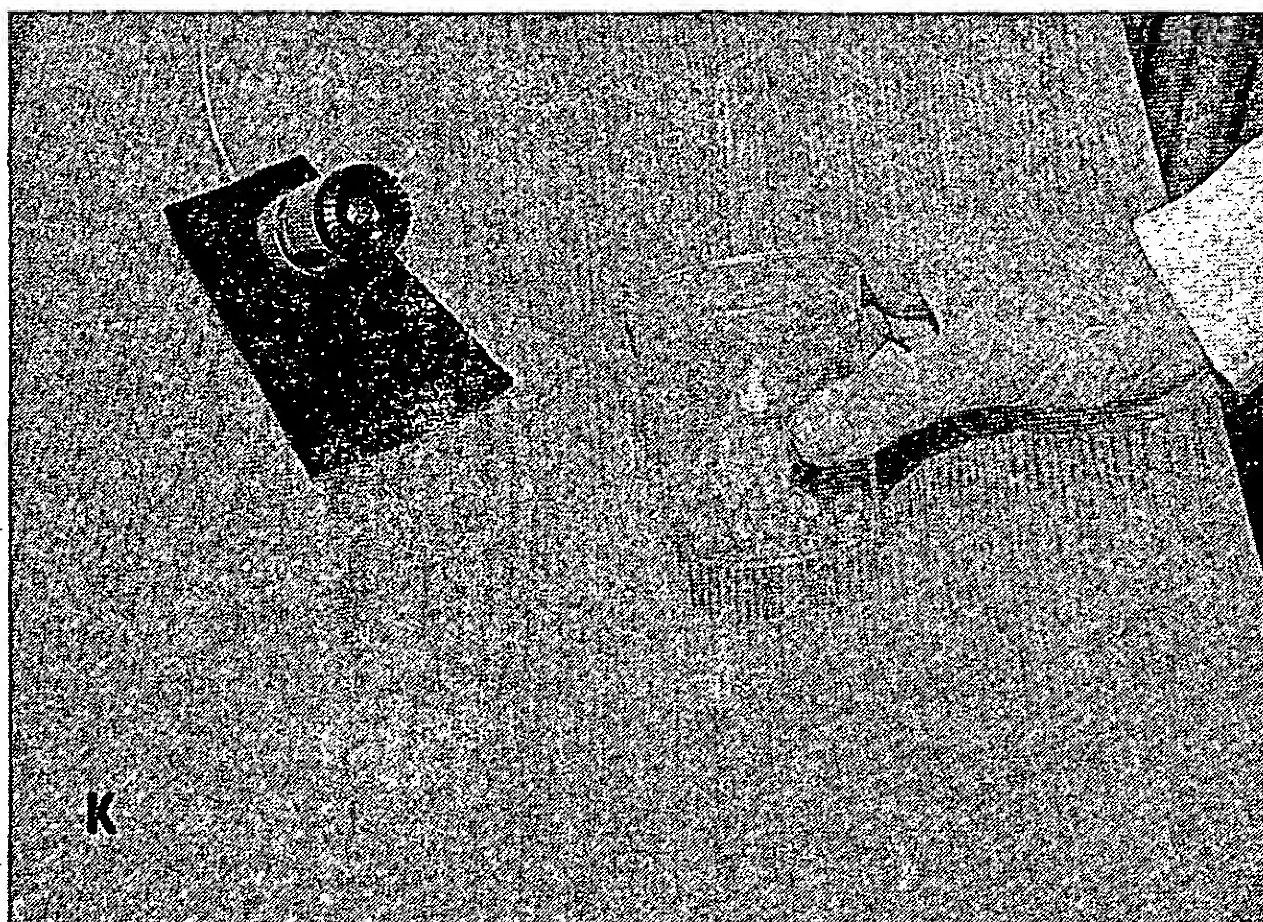

G

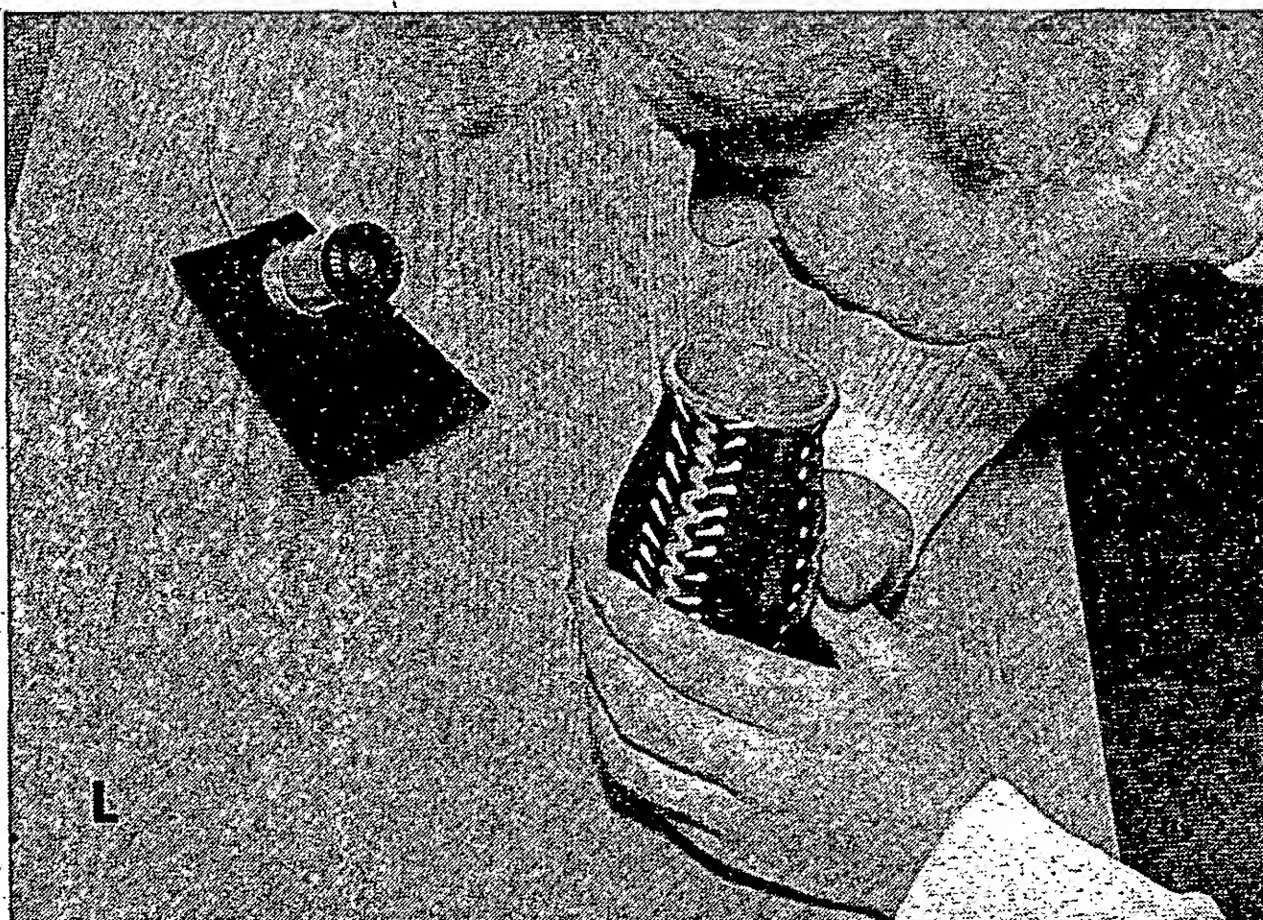

H


I


J

get, dosáhneme zvukové iluze, že jsme si klestili cestu rákosím.





LODNÍ SIRÉNA – obr. **E**

Chceme-li napodobit houkání parníku, použijeme k tomuto zvukovému triku prázdnou *láhev od piva. Silné foukání* přes hrdlo láhve před mikrofonem dokáže imitovat ochraptělý zvuk lodní sirény. Výšku tónu můžeme libovolně měnit částečným doléváním vody do láhve. Čím více bude vody v láhvi, tím vyšší bude vydávaný tón.

OHEŇ – obr. **F**

K vytvoření intimního praskání ohně v krbu, popřípadě hluku velkého požáru, nám postačí arch celofánu. Mačkáme-li *celofán ve vhodné vzdálenosti od mikrofonu*, obdržíme při reprodukci nahrávky zvuk praskajícího ohně, který od skutečného nepozná ani zkušený požárník. Velký oheň se ovšem dá udělat také tak, že se mačká před mikrofonem skelný papír.

LÁMÁNÍ DŘEVA – obr. **G**

Zvuk lámaného dřeva lze imitovat pomocí prázdné krabičky od zápalek. V dlani zmáčknutá krabička dá před mikrofonem perfektní zvuk lámajícího se dřeva.

KROKY

Na kroky v lese nám postačí kus starého magnetofonového pásku. Ten vezmeme do hrsti a mačkáme ho v rytmu chůze před mikrofonem.

KROKY NA SNĚHU

Na vytvoření imitace zvuku chůze po sněhu postačí trocha škrobu nebo bramborové moučky. PVC sáček naplněný škrobem stlačujeme před mikrofonem v pravidelném rytmu, asi tak, jako jde ve skutečnosti člověk po zmrzlém, vrzajícím sněhu.

LYŽOVÁNÍ

K domácímu lyžování je nejvhodnější malé ploché prkénko a drsná přikrývka. Zvuk lyží vznikne, posouváme-li prkénko po přikrývce, chvílemi blízko, chvílemi od mikrofonu.

CESTA RÁKOSÍM – obr. **H**

I obtížná cesta rákosím se dá v klidu pokoje snadno vykouzlit. Lámeme-li před mikrofonem svazek makaronů nebo špaget, dosáhneme zvukové iluze, že jsme si klestili cestu rákosím.

DUSOT KOPYT – obr. **I**

Potřebujeme-li nahrát zvuk běžícího koně, pak postačí, když budeme tlouci před mikrofonem okraji dvou prázdných pohárků z plastické hmoty o sebe. Při reprodukci záznamu pak zjistíme, že jsme tímto jednoduchým trikem udělali dokonalou imitaci dusotu koňských kopyt. *Podle rychlosti narážení pohárků o sebe* pak vznikne klus nebo trysk. Stejný zvuk lze udělat, vezmeme-li dvě prázdné půlky kokosového ořechu, kterými o sebe klepeme. Obalíme-li je šátkem, budou cválat koně po louce nebo lesem.

VÝSTŘELY

Tyto zvuky se dají rychle a snadno imitovat s pomocí pravítka. Uhodíme-li před mikrofonem krátce a prudce dřevěným pravítkem naplno o desku stolu, pak nám *při přehrávání pásku z magnetofonu* zazní výstřel z pistole či pušky. Výstřel z děla můžeme při ozvučování udělat tak, že před mikrofonem uhodíme balíkem časopisů o desku stolu.

ŘINČENÍ MEČŮ – obr. **J**

I doma lze imitovat staré rytířské hry. Budeme-li tlouci před mikrofonem dvěma vidličkami v rytmu o sebe, získáme, podle vzdálenosti od mikrofonu, nejlitější souboj dvou ozbrojenců.

ŘEZÁNÍ PILOU

Tento zvukový trik vytvoří prázdná krabička od zápalek. Posunujeme-li sem a tam prázdný vnitřek v obalu, vzniknou při reprodukci zcela přirozené zvuky pily, od kutilské pilky až po zvuky pily kotoučové (podle vzdálenosti od mikrofonu).

JÍZDA LOKOMOTIVY

Potřebujeme-li na magnetofonovém pásku zaznamenat jízdu lokomotivy, uděláme to *před mikrofonem tak, že budeme* třít o sebe dvě prkénka potažená hedvábným papírem.

LET TRYSKOVÉHO LETADLA

Burácení proudového motoru se dá snadno vytvořit pomocí elektrického vysoušeče na vlasy. Ten zapnutý podržíme před mikrofonem. Zanikání zvuku motoru dosáhneme vhodně přidržovaným kouskem kartónu, který vsuneme do proudu vzduchu od vysoušeče.

GONG

S pravítkem a sklenkou na víno se dá udělat další domácí kouzlo. Klepneme-li před mikrofonem několikrát lehce pravítkem do okraje vinné sklenky s nožkou, zazní „skleněný" gong, který je k nerozeznání od skutečného.

DEFEKT STROJE – obr. **K**

Hrách se dá také využít k imitaci zvuku porouchaného stroje. Uvedeme-li před *mikrofonem do krouživého* pohybu (v poháru z plastické hmoty) zrnka suchého hrachu, získáme zvuky porouchaného stroje, zadřeného ložiska apod.

HLAS V TELEFONU – obr. **L**

Také iluze telefonního hovoru se dá snadno vytvořit. Mluvíme-li před mikrofonem do větší vázy nebo kameninového hrnku, uděláme zvukový snímek, který je při reprodukci k nerozeznání od skutečného telefonního hovoru.

Foto autor textu